



Fachgebiet Holztechnologie

**Die Verklebung von Buchenholz für tragende Holzbauteile
unter besonderer Berücksichtigung der Farbverkernung**

Michael K. Schmidt

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Forstwissenschaft

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. rer.silv. Thomas F. Knoke

Prüfer der
Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jan-Willem G. van de Kuilen
2. Univ.-Prof. (i.R.) Dr.rer.silv. Dr.rer.silv.habil. Dr.h.c. Gerd Wegener
3. Univ.-Prof. Dr-Ing. Peter Niemz
(Eidgenössische Technische Hochschule Zürich/Schweiz)

Die Dissertation wurde am 4. Dezember 2013 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am 26. März 2014 angenommen.

Danksagung

Den beiden ehemaligen Professoren der Holzforschung München, Herrn Univ.-Prof. (i.R.) Dr.rer.silv. Dr.rer.silv.habil. Dr.h.c. Gerd Wegener und Herrn Univ.-Prof. (i.R.) Dr.-Ing. Peter Glos, ist es zu verdanken, dass das Forschungsvorhaben überhaupt auf den Weg gebracht wurde und die entsprechenden finanziellen Mittel zur Verfügung standen. Darüber hinaus haben beide Professoren die notwendigen Rahmenbedingungen in den folgenden Jahren für die Forschungsaktivitäten geschaffen und mich in vielfältiger Weise unterstützt. Stetige Anstöße und Ermutigungen zur Vollendung der Arbeit kamen von Prof. Dr.-Ing. Jan-Willem van de Kuilen. Vielen Dank.

Besonders hervorzuheben ist mein ehemaliger Kollege und Freund Markus Knorz, der in zahlreichen Gesprächen die Ergebnisse und die Methoden der Arbeiten immer wieder kritisch mit mir diskutiert hat. Auch bei den Versuchen im Labor stand er mir oftmals hilfreich zur Seite.

Die vielen Versuche, die im Rahmen der Teilarbeit II durchgeführt wurden, wären ohne das hohe persönliche Engagement und den Fleiß von Astrid Thönnißen nicht möglich gewesen. Liebe Astrid – vielen Dank!

Ich danke außerdem allen anderen Mitarbeitern der Holzforschung München für die freundliche Arbeitsatmosphäre und die Hilfsbereitschaft, die das Arbeiten besonders angenehm gemacht hat. Besonders hervorheben möchte ich an dieser Stelle Ralf Diebold, Peter Stapel, Stefan Torno, Frank Hunger, Andreas Rais, Dr. Elisabeth Windeisen, Jörg Schaffrath und Volker Schmidt.

Für die hervorragende und zuverlässige Vorbereitung der Proben bedanke ich mich außerdem bei Roland Braun und Bruno Fischer, dem Leiter der Holz-Werkstatt.

Mein Dank gilt auch der Bayerischen Forstverwaltung, die mir die Möglichkeit eröffnet hat, an der Holzforschung München zu arbeiten. Mit der Bereitschaft zur praktischen Umsetzung der Ergebnisse hat die Forstverwaltung dem Projekt einen zusätzlichen Schub verliehen.

Meiner Familie und meiner Frau Julia danke ich für die liebevolle Unterstützung, den Zuspruch und die Geduld, die sie mir während und vor allem gegen Ende der Anfertigung dieser Arbeit entgegengebracht haben. Ihr habt mir sehr geholfen, diesen Weg zu gehen.

**„Es ist nicht genug zu wissen – man muss auch anwenden;
es ist nicht genug zu wollen – man muss auch tun.“**

Johann Wolfgang von Goethe
Wilhelm Meisters Wanderjahre III.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	I
Inhaltsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	VII
Vorwort zur publikationsbasierten Promotion	VIII
1 Einleitung	1
2 Stand des Wissens	3
2.1 Klebstoffe im tragenden Holzbau	3
2.2 Leistungsanforderungen an Klebeverbindungen in tragenden Holzbauteilen	7
2.2.1 Klebefugenbeständigkeit und Scherfestigkeit	7
2.2.1.1 Delaminierungsprüfung	9
2.2.1.1.1 Methoden	9
2.2.1.1.2 Beanspruchung der Klebefuge und Einfluss des Holzes	10
2.2.1.1.3 Prüfverfahren und baurechtliche Vorgaben	16
2.2.1.1.4 Ergebnisse für Buchenholz	17
2.2.1.2 Scherfestigkeit	20
2.2.1.2.1 Methoden	20
2.2.1.2.2 Ergebnisse für Buchenholz	21
2.3 Verfestigen der Leimfuge in Abhängigkeit verklebungsrelevanter Holzeigenschaften	22
2.3.1 Abbinden	22
2.3.2 Aushärten	24
2.3.2.1 Extraktstoffe	25
2.3.2.2 pH-Wert	26
2.3.2.3 Säurepufferungsvermögen	27
2.4 Fakultative Farbverkernung bei Buche	28
2.4.1 Bedeutung, Ausprägung und Entstehung	28

2.4.2	Anatomische Veränderungen	33
2.4.3	Chemische Veränderungen	34
2.4.3.1	Extraktstoffe	34
2.4.3.2	pH-Wert	35
2.4.3.3	Säurepufferungsvermögen	37
2.5	Methoden zur Charakterisierung der Klebstoffverfestigung	38
2.5.1	Einbeziehung des Faktors Holz	38
2.5.2	Daumentest	38
2.5.3	Dynamisch-mechanische Analyse	39
2.5.4	Gelierzitmessung	40
2.5.5	Zugscherfestigkeit	41
3	Zielsetzungen	43
3.1	Delaminierung und Scherfestigkeit (Teilarbeit I)	43
3.2	Charakterisierung verklebungsrelevanter Holzeigenschaften von Buche (Teilarbeit II)	43
3.3	Entwicklung einer Methode zur Charakterisierung des Verfestigens einer Leimfuge (Teilarbeit III)	44
4	Material	45
5	Ergebnisse der Teilarbeiten	47
5.1	Delaminierung und Scherfestigkeit (Teilarbeit I)	47
5.1.1	Delaminierung	47
5.1.2	Scherfestigkeitsprüfung	48
5.2	Charakterisierung verklebungsrelevanter Holzeigenschaften von Buche (Teilarbeit II)	49
5.2.1	Wasseraufnahmevermögen	50
5.2.2	Extraktstoffgehalt	53
5.2.3	pH-Wert	54
5.2.4	Säurepufferungsvermögen	55
5.3	Entwicklung einer Methode zur Charakterisierung des Verfestigens einer Leimfuge (Teilarbeit III)	57
6	Diskussion	62

6.1 Delaminierung und Scherfestigkeit (Teilarbeit I)	62
6.1.1 Delaminierung	62
6.1.2 Scherfestigkeitsprüfung	65
6.2 Charakterisierung verklebungsrelevanter Holzeigenschaften von Buche (Teilarbeit II)	67
6.2.1 Wasseraufnahmevermögen	67
6.2.2 Extraktstoffe	69
6.2.3 pH-Wert	70
6.2.4 Säurepufferungsvermögen	73
6.3 Entwicklung einer Methode zur Charakterisierung des Verfestigens einer Leimfuge (Teilarbeit III)	74
7 Synthese	77
8 Literaturverzeichnis	80
Kurzfassung	89
Appendix	90
Lebenslauf	92

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Auswirkung der Quellung bei Lamellenanordnung a (links) und b (rechts); oben: Zustand vor der Wasserlagerung, unten: idealisierte Verformung der Lamellen nach der Wasserlagerung bei unbehinderter Quellung 13
- Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Prüfkörpers (Sicht auf Schmalseite); Pfeile stellen die Zugspannungen quer zur Faser dar, die auf die Klebefugen bei der Rücktrocknung wirken 14
- Abbildung 3: Trocknungsrisse in Prüfkörpern aufgebaut aus Lamellen mit liegenden (links) und stehenden (rechts) Jahrringen 16
- Abbildung 4: Rot- (links) bzw. Spritzkern (rechts) bei Buche 30
- Abbildung 5: Eindringen der Berberinlösung im Bereich des Spritzkernrandes bei Buche 52
- Abbildung 6: Eindringen der Berberinlösung in unverkerntes Buchenholz 52
- Abbildung 7: Eindringen der Berberinlösung im Bereich eines Braunkernrandes bei Eschenholz (Kernrand mit roter Linie kenntlich gemacht) 53
- Abbildung 8: Eindringen der Berberinlösung in unverkerntes Eschenholz 53

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verschiedene Delaminierungsverfahren zur Bestimmung der Klebefugenbeständigkeit	10
Tabelle 2: Vergleich bisheriger Arbeiten im Hinblick auf die untersuchten Parameter	18
Tabelle 3: Wasseraufnahmekoeffizienten w_t verschiedener Holzarten über die tangentialen Oberfläche	24
Tabelle 4: Bisherige und neue Bezeichnung der verwendeten MUF-Klebstoffsysteme	46
Tabelle 5: Ergebnisse für unverkerntes, rot- und spritzkerniges Buchenholz sowie für Fichtenholz (Mittelwerte und Anzahl der Messwerte)	50
Tabelle 6: Reduktion des Spaltabstandes in μm , maximale Kraft (F_{max}) in N und verbrauchte Energie (w) in J zur Trennung der Füge-teile für unverkerntes, rot- und spritzkerniges Buchen- sowie für Fichtenholz in Abhängigkeit von der geschlossenen Wartezeit (Mittelwerte)	58

Vorwort zur publikationsbasierten Promotion

Die vorliegende Arbeit beschreibt die wissenschaftliche Fragestellung, gibt den Stand des Wissens umfassend wieder und fasst die Ergebnisse der drei Erstautorenveröffentlichungen (full paper in einem englischsprachigem international verbreiteten Publikationsorgan mit peer review) in knapper Form zusammen. Darüber hinaus werden die Resultate der Teilarbeit II und III ergänzt um neue Messergebnisse, die weitergehende Aussagen erlauben. Abschließend werden die erarbeiteten Resultate der drei Teilarbeiten in einen Gesamtzusammenhang gestellt und vor dem Hintergrund der Literatur diskutiert.

Die vom Erstautor eingebrachten Anteile zur Entstehung der drei Veröffentlichungen sind im Appendix dargestellt.

1 Einleitung

Der sich abzeichnende Klimawandel und dessen voraussichtliche Auswirkungen auf die Wachstumsbedingungen in den mitteleuropäischen Wäldern erfordern von der Forstwirtschaft Anpassungsstrategien, die dazu führen, dass heimische Laubhölzer zukünftig eine noch wichtigere Rolle beim Aufbau stabiler Wälder einnehmen. Eine zentrale Rolle spielt hierbei die Buche (*Fagus sylvatica* L.), die aus vegetationskundlicher, naturschutzfachlicher und waldbaulicher Sicht zu einer der wichtigsten Baumarten Mitteleuropas zählt.

Im Widerspruch zur zunehmenden forstlichen Bedeutung der Buche stehen allerdings die unzureichenden Absatzmöglichkeiten für Buchenstammholz und für das daraus gewonnene Schnittholz. Ein interessanter, aber ein immer noch unerschlossener Bereich wäre die Verwendung von Buchenholz in tragenden Bauteilen im Hochbau (z. B. Gehri, 1985). Neue Einsatzbereiche eröffnen sich hier nicht nur auf Grund der ansprechenden Holzoberfläche, sondern auch durch die im Vergleich zu Nadelholz wesentlich höheren Festigkeitswerte. Beispielsweise lassen sich, ohne Einbußen in der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit schlankere und damit architektonisch anspruchsvollere Konstruktionen realisieren als mit Fichtenholz. Zudem ergeben sich konstruktive Vorteile im Bereich der Anschlüsse, da Buchenholz auch höhere Querdruck- und Lochleibungsfestigkeiten besitzt.

Allerdings weist Buchenholz auch Eigenschaften auf, die eine Verwendung im konstruktiven Bereich erschweren. Nachteilig sind beispielsweise das ausgeprägte Quell- und Schwindverhalten sowie die häufig anzutreffende Krummschäftigkeit der Stämme, was die Länge der Schnitthölzer reduziert. Diese Nachteile lassen sich nur überwinden, wenn man anstatt Vollholz verklebte Produkte verwendet: Die Formstabilität nimmt zu und die Abmessungen der Bauteile können den jeweiligen konstruktiven Erfordernissen angepasst werden. Die Verklebung ist somit ein zentraler Baustein, um Buchenholz im konstruktiven Bereich in den Markt einzuführen. Bevor jedoch Klebstoffe in tragenden Holzkonstruktionen Verbindungsaufgaben übernehmen dürfen, müssen zunächst umfangreiche Prüfungen durchlaufen und definierte Leistungsanforderungen erfüllt werden. Die Prüfungen werden unter anderem an dem geklebten Verbund nach dem Verfestigen durchgeführt und sollen zeigen, inwieweit sich mit dem verwendeten Klebstoff und der gewählten Klebetechnologie dauerhafte Verbindungen erzielen lassen. In bisherigen Untersuchungen konnte dieser Nachweis für Buchenholzverklebungen nur teilweise erbracht werden.

Für die Herstellung zuverlässiger und dauerhafter Klebeverbindungen ist es notwendig, die spezifischen Eigenschaften der Füge­teile zu kennen, um deren Interaktion mit dem verwendeten Klebstoffsystem während des Verfestigens abschätzen zu können. Erreicht wird das Verfestigen der Klebefuge durch physikalische (sog. Abbinden) oder chemische Prozesse (sog. Aushärten) (z. B. Zeppenfeld und Grunwald, 2005). Sind die jeweiligen verklebungsrelevanten Eigenschaften des Holzes nicht bekannt oder variieren diese in einem großem Bereich (intraspezifischen Variationen), so kann es bei einem nicht abgestimmten Verklebungsprozess bereits bei der Ausbildung der Klebefuge zu Fehlverklebungen kommen. Für das Holz der Buche sind die verklebungsrelevanten Eigenschaften bisher nur unzureichend beschrieben.

Insbesondere für das farbverkernte Kernholz, das in erheblichem Umfang auftritt, liegen nur lückenhafte Informationen vor. Erschwerend kommt hinzu, dass es verschiedene obligatorische Farbkerntypen gibt, die sich hinsichtlich der Genese unterscheiden und damit möglicherweise auch unterschiedliche verklebungsrelevante Eigenschaften besitzen. Diese Vielgestaltigkeit könnte letztendlich dazu führen, dass sich Buchenholz nicht mit einer einheitlichen Klebetechnologie verkleben lässt und die wirtschaftliche Herstellung von Bauteilen damit fraglich wird.

Kenntnisse über die verklebungsrelevanten Eigenschaften sind allerdings nur ein Baustein, um die ablaufenden Prozesse während des Verfestigens der Klebeverbindung besser abschätzen zu können. Darüber hinaus ist es notwendig, die tatsächlich auftretenden Wechselwirkungen zwischen Klebstoff und Füge­teil zu erfassen. Hierfür stehen eine ganze Reihe von Methoden zur Verfügung, die erlauben, das Verfestigen eines Klebstoffsystems zu beschreiben. Jedoch spiegeln die Versuchsbedingungen vielfach nicht die tatsächlichen Gegebenheiten wider oder es lassen sich mittels der bestehenden Verfahren bestimmte Fragestellungen nicht untersuchen. Erforderlich sind daher neue Methoden, die ein verbessertes Verständnis der tatsächlich stattfinden Prozesse ermöglichen und gegebenenfalls eine Optimierung der Klebetechnologie erlauben.

2 Stand des Wissens

2.1 Klebstoffe im tragenden Holzbau

Der wichtigste Klebstofftyp zur Produktion tragender Holzbauteile in Europa sind die Melamin-Harnstoff-Formaldehydharze (MUF). Fast 50% des in Europa hergestellten Brett-schichtholzes (BSH) wurden im Jahr 2005 mit diesem Klebstofftyp verklebt (Mack, 2006). Es ist davon auszugehen, dass sich dieser Anteil in den letzten Jahren trotz der Einführung neuer Klebstofftypen nur geringfügig verändert hat. So sind zwar schnell verfestigende Emulsion-Polymer-Isocyanate (EPI) mittlerweile bauaufsichtlich zugelassen, allerdings werden diese bisher nur in geringem Umfang eingesetzt. Polyurethane (PUR) sind bereits seit einigen Jahren fest etabliert, werden aber vorrangig zur Herstellung von Keilzinkenverbindungen verwendet. Im Bereich der Flächenverklebung überwiegen in Deutschland die MUF-Klebstoffe. In den letzten Jahren wurde diese Marktposition durch die Einführung schnell verfestigender MUF-Systeme konsolidiert, wodurch die Herstellung verklebter Holzbauprodukte insgesamt effizienter gestaltet werden konnte. Diese positiven Entwicklungen lassen erwarten, dass MUF-Leime trotz der Einführung und Weiterentwicklung konkurrierender Klebstoffsysteme auch zukünftig eine wichtige Rolle spielen werden. Vor dem Hintergrund der weiten Verbreitung von MUF-Klebstoffen, den langjährigen positiven Erfahrungen und der hellen Leim-fuge, die zwischen den Fügeteilen nahezu unsichtbar ist und insbesondere bei hellen Holz-arten ein wichtiges optisches Kriterium ist, steht dieser Klebstofftyp im Mittelpunkt der weiteren Betrachtungen.

In Europa werden MUF-Klebstoffe vorwiegend zur Herstellung von Holzbauprodukten aus Fichtenholz verwendet, hierfür liegen auch die meisten Erkenntnisse und langjährig ange-sammeltes Praxiswissen vor. Zur Verklebung von Laubholz gibt es zwar Hinweise und Emp-fehlungen (Radovic, 2005), jedoch beruhen diese zumeist auf Erfahrungswissen und nicht auf systematischen Untersuchungen. Nur für Eichenholz wurden bisher umfangreiche Unter-suchungsergebnisse zur Verklebung dieser heimischen Laubholzart vorgelegt (Aicher und Stapf, 2007). Es zeigte sich, dass die als universell einsetzbar geltenden Phenol-Resorcin-Formaldehyd-Klebstoffe (PRF-Klebstoffe) sich hierfür besonders eignen, während sich nur

mit einem der drei untersuchten MUF-Klebstoffe eine ausreichende Beständigkeit der Klebefuge erreichen ließ.

Die Einführung von MUF-Klebstoffen war eng mit der Weiterentwicklung der Harnstoff-Formaldehydharze (UF) verknüpft. Ein Nachteil der UF-Klebstoffe ist, dass die Kondensationsreaktion zwischen Harnstoff und Formaldehyd reversibel ist, was zu einer geringen Hydrolysebeständigkeit führt. Bei lang anhaltender hoher Luftfeuchte reduziert sich die Klebefugefestigkeit hierdurch deutlich (Raknes, 1997). Um die beschränkte Hydrolysebeständigkeit zu verbessern, werden daher UF-Klebstoffe gezielt mit Melamin verstärkt. Ähnlich wie die Reaktion zwischen Harnstoff und Formaldehyd verläuft die Methylierung im schwach alkalischen Bereich zwischen Melamin und Formaldehyd, allerdings sind die dabei entstehenden C-N-Bindungen zwischen der Amidgruppe des Melamins und dem Formaldehyd deutlich stabiler (Dunky und Niemz, 2002). Dass diese Methylierbindungen hydrolysebeständiger sind, ist auf die aromatische Ringstruktur des Melamins und der damit verbundenen stärkeren Vernetzung des Stickstoffs zurückzuführen (Troughton, 1969). Im Anschluss an die Methylierung findet die im sauren Milieu ablaufende Kondensation der Methyliermelamine statt. Im Vergleich zur Kondensation der Methylierharnstoffe ergeben sich auch hier stabilere Verbindungen innerhalb des Polymers: Die sauerstofffreien Methylierbrücken sind thermo- und hydrostabiler als die Methylieretherbrücken, die bei der Kondensation der Methylierharnstoffe entstehen (Dunky und Niemz, 2002).

Die höchste Hydrolysebeständigkeit wird bei Verwendung reiner Melamin-Formaldehydharze (MF) erreicht. Jedoch ist die Lagerbeständigkeit geringer als bei MUF-Klebstoffen und die Kosten sind vergleichsweise hoch, da Melamin teurer als Harnstoff ist. Daher werden in der Praxis UF-Klebstoffe regelmäßig nur bis zu einem bestimmten Grad mit Melamin verstärkt (z. B. Pizzi und Mittal, 2003). Letztendlich bestimmt der hinzugefügte Anteil von Melamin bzw. die Anzahl der stabilen Bindungen die Hydrolysestabilität des Polymers. Die MUF-Klebstoffe, die im tragenden Bereich zur Anwendung kommen, werden in einem mehrstufigen Prozess durch eine Co-Kondensation von Melamin, Harnstoff und Formaldehyd hergestellt. Verfahrenstechnisch und chemisch verläuft die Co-Kondensation identisch wie die UF-Homokondensation (Grunwald, 2002). Ist der gewünschte Grad der Vorkondensation des Klebstoffs erreicht, so wird durch gezielte Erhöhung des pH-Werts sowie durch Absenken der Temperatur die weitere Polymerisation unterbrochen und der Klebstoff leicht alkalisch eingestellt. Nach einer weiteren Zugabe von freiem Formaldehyd und Additiven ist der Klebstoff für mehrere Monate lagerfähig und in einem Lösungsmittel dispergiert (Grostad, 2008).

Diese wässrigen Lösungen werden auch als Leime¹ bezeichnet. Bei handelsüblichen MUF-Klebstoffen für tragende Verbindungen beträgt der Massenanteil des Wassers im Klebstoffgemisch oftmals bis zu 50%. Bei üblichen Auftragsmengen von 300-400 g/m² befinden sich in dem Gemisch aus Harz und Härter somit 150-200 g Wasser pro m² in der Klebeschicht, das nach dem Fügen vorrangig in das Holz abwandert.

MUF-Klebstoffe für die Herstellung von span- oder fasergebundenen Holzwerkstoffen haben einen Melaminanteil, bezogen auf die Masse des Flüssigleims, von maximal 10% (Dunky und Niemz, 2002). Bei der Herstellung von Bauprodukten aus Vollholz werden hingegen Melaminanteile verwendet, die regelmäßig um den Faktor drei höher liegen. Verbunden mit dieser Erhöhung des Melaminanteils ist ein langsamerer Abfall des pH-Werts in der Leimfuge, der auch die Aushärtungsgeschwindigkeit² verringert (Dunky und Niemz, 2002).

Ein Nachteil der MUF-Klebstoffe ist, dass bei der Vernetzung ein sprödes und unflexibles Polymer ausgebildet wird (Pizzi und Mittal, 2003). Im Hinblick auf die spezifischen Anforderungen in tragenden Holzbauteilen sind allerdings gewisse elastische Eigenschaften der Klebefugen erwünscht, was durch einen Zusatz von Polyvinylacetatleim (PVAc) erreicht wird (Habenicht, 2009). Dieser ausschließlich physikalisch abbindende³ Leim wird in wässriger Dispersion dem Härter der MUF-Systeme beigemischt. Die Abbindegeschwindigkeit von PVAc hängt somit nur von der Entfernung der wässrigen Phase durch Verdunstung bzw. Eindringen in die Fügeteiloberfläche ab, da erst dann die dispergierten Teilchen aggregieren (Dunky und Niemz, 2002). Die erreichte Elastifizierung der Klebefuge wird maßgeblich vom zugegebenen PVAc-Anteil beeinflusst. Über die entsprechenden Anteile und Formulierungen können keine genaueren Angaben gemacht werden, da sich die eingesetzten Rezepturen im Eigentum der Klebstoffhersteller befinden und nicht öffentlich zugänglich sind.

Während des Verfestigens der Klebefuge ist das Abbinden des beigemischten PVAc-Anteils nur ein Teilaspekt. Daneben beginnt, nach erfolgter Vermengung von Leim und Härter, das chemische Aushärten des Klebstoffsystems. Der vorkondensierte Leim ist leicht alkalisch eingestellt und somit in der erforderlichen Viskosität für mehrere Monate lagerfähig. Durch die erneute Zugabe von Säure (z. B. Ameisensäure), dem sogenannten Härter, werden die ba-

¹Die ursprüngliche Definition des Begriffs wurde mittlerweile auch auf synthetische Klebstoffe erweitert (DIN EN 923).

²Im Folgenden wird der Begriff Härten in Anlehnung an Zeppenfeld und Grunwald (2005) verwendet. Das Aushärten subsummiert alle chemischen Prozesse während des Verfestigens des Klebstoffgemisches.

³Im Folgenden wird der Begriff Abbinden in Anlehnung an Zeppenfeld und Grunwald (2005) verwendet. Das Abbinden subsummiert alle physikalischen Prozesse während des Verfestigens des Klebstoffgemisches.

sischen Bestandteile des Leims neutralisiert, der pH-Wert abgesenkt und die Polykondensationsreaktion wieder ausgelöst.

Die Vermengung von Leim und Härter erfolgt entweder vor dem Auftrag des Klebstoffgemischs auf das Füge teil im sogenannten Untermischverfahren oder im getrennten Auftrag von Leim und Härter. Beim getrennten Auftrag vermengen sich die beiden Komponenten erst beim Fügen bzw. beim Pressen der Füge teile. Die Aushärtungsgeschwindigkeit hängt maßgeblich von der Härterdosierung ab: Je höher die Dosierung, desto mehr Protonen stehen für die Polykondensation zur Verfügung und entsprechend rascher läuft die Aushärtung ab. Hat die Kondensationsreaktion begonnen, so wird hierbei kontinuierlich Wasser freigesetzt. Im Vergleich zur Wassermenge, die als Lösungsmittel im Klebstoffsystem enthalten ist und sich ebenfalls im Bereich der Klebefuge befindet, entsteht bei der Aushärtung vergleichsweise wenig Wasser.

River et al. (1991) verweisen auf die weitreichende Bedeutung des Wassers sowie auf die Notwendigkeit einer auf den Prozess der Klebstoffverfestigung abgestimmten und kontinuierlichen Abwanderung des Wassers. Geht das Lösungsmittel zu schnell verloren, so kann die chemische Reaktion nicht vollständig ablaufen und es kommt in der Folge zu einer geringen Bindefestigkeit, da der Klebstoff austrocknet. Hingegen birgt ein zu langsames Abwandern die Gefahr, dass es zu Wassereinschlüssen in der Klebeschicht kommt und sich nachfolgendes Schwinden negativ auf die Qualität der Verklebung auswirkt (Habenicht, 2009). Durch eine angepasste Klebetechnologie können derartige Fehlentwicklungen verhindert werden (z. B. River et al., 1991).

Frihart (2009) ordnet die MUF-Harze der Gruppe der sogenannten in situ polymerisierenden Klebstoffe zu. Gegenüber den prä-polymerisierten Klebstoffen haben diese den Vorteil, dass es ihnen möglich ist, im noch unvernetzten Zustand in die Zellwände einzudringen und dort auszuhärten. Zu den prä-polymerisierten Klebstoffen zählen die Epoxidharze, die EPI-, PUR- und PVAc- Klebstoffe. Frihart (2009) geht davon aus, dass diese Eigenschaft das Quellen des Holzes im Bereich der Grenzfläche reduziert und es dadurch zu einer erhöhten Fugenbeständigkeit bei Feuchteinfluss kommt.

2.2 Leistungsanforderungen an Klebeverbindungen in tragenden Holzbauteilen

2.2.1 Klebefugenbeständigkeit und Scherfestigkeit

Die Dauerhaftigkeit von Verklebungen ist eine wesentliche Voraussetzung für die Verwendung tragender Holzbauteile im Bauwesen. Die vielen positiven Beispiele im Bereich des Ingenieurholzbaus belegen, dass sichere Klebeverbindungen hergestellt werden können, wenn bestimmte Qualitätsstandards bei der Produktion eingehalten und gleichzeitig eine situationsangepasste Auswahl der verwendeten Baustoffe bzw. Bauprodukte erfolgt. So ist es beispielsweise zwingend erforderlich, ein für den vorliegenden Anwendungsfall geeignetes Klebstoffsystem zu verwenden, damit die Klebeverbindungen den Anforderungen langfristig gewachsen sind. Obwohl die Klebeverbindung während der Nutzungsdauer eines Hauses, einer Halle oder einer Brücke verschiedensten Belastungen ausgesetzt ist, darf die Bindefestigkeit nicht oder zumindest nicht wesentlich nachlassen (z. B. Egner und Kolb, 1966). Neben der dauerhaft vorhandenen mechanischen Beanspruchung der Fuge können Schwankungen der Temperatur, der Feuchtigkeit und die einwirkende Strahlung die Klebeverbindungen zusätzlich beeinträchtigen (z. B. Habenicht, 2006). In der Praxis treten diese Beanspruchungen fast immer gleichzeitig auf und führen zu komplexen, zeitabhängigen Alterungsbeanspruchungen.

Inwieweit ein Klebstoff bzw. eine Klebeverbindung diesen Beanspruchungen gewachsen ist, wird in Lang- oder in Kurzzeitversuchen überprüft. Langzeitversuche gliedern sich in zwei Phasen: Zunächst werden Prüfkörper zumeist für mehrere Jahre ungeschützt im Freien, unter Dach oder in beheizten Innenräumen eingelagert. Teilweise werden die Fugen während der Lagerung zusätzlich noch mechanisch beansprucht. Im Anschluss an diese Alterungsphase werden die Klebeverbindungen mittels bestimmter Prüfverfahren getestet und die noch vorhandene Bindefestigkeit beurteilt (z. B. Clad, 1960; Egner und Kolb, 1966; Raknes, 1997). Der Vorteil dieser langjährigen Versuchsdurchführung ist, dass die Alterung unter Bedingungen erfolgt, die weitestgehend mit dem geplanten Anwendungsgebiet übereinstimmen. Allerdings haben insbesondere die Freibewitterungsversuche verschiedene Nachteile. Ungünstig wirkt sich nach Deppe und Schmidt (1982) aus, dass

- der Versuch durch makro- und mikroklimatische Parameter verschieden stark beeinflusst wird,
- die Verfahren nicht genormt sind
- und die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse nicht gegeben ist.

Ein besonderer Schwachpunkt der Langzeitversuche ist deren Dauer, die mit den oftmals kurzen Entwicklungs- und Produktionszyklen nicht vereinbar ist (z. B. Habenicht, 2006). Es wurden daher Prüfverfahren entwickelt, die in zeitlich geraffter Form entsprechende Aussagen über die Beständigkeit der Klebeverbindung erlauben. Um die Lagerungsphase zu verkürzen, wird die Intensität der Beanspruchung mit dem Ziel erhöht, eine beschleunigte Alterung der Klebeverbindung zu erreichen. Hierbei besteht allerdings die Gefahr, dass die Beanspruchungen entweder zu hoch oder zu gering sind und die Prüfungsergebnisse daher unrealistisch werden (Deppe und Schmidt, 1982).

Kurzzeitversuche werden einerseits bei statischen Klimabedingungen (z. B. Radovic und Goth, 1994; Clad, 1960; Iwata und Ingaki, 2006; Northcott et al., 1968) oder bei zyklisch wechselnden Klimabedingungen durchgeführt (z. B. Radovic und Goth, 1994; Clad, 1960; Deppe und Schmidt, 1994; Deppe und Schmidt, 1979; Noack und Frühwald, 1976; Raknes, 1997; Clad, 1960; Bröker und Blaik, 1986; Vick und Okkonen, 1998; Northcott et al., 1968). Variierende Klimabedingungen, die bei den Kurzzeitversuchen künstlich erzeugt werden, führen zu einer Änderung der Holzfeuchte und letztendlich zum Quellen oder zum Schwinden des Holzes. Da die Verformung zweier Fügeiteile durch die Klebeverbindung eingeschränkt wird, kommt es im Bereich der Fuge zu Spannungen. Prüfverfahren, die ausschließlich mit den vom Holz induzierten Spannungen arbeiten und keine weiteren mechanischen Untersuchungen einbeziehen, werden auch als Delaminierungsprüfungen⁴ bezeichnet.

⁴Bucur (2011) gibt einen umfassenden Überblick über den Gebrauch des Begriffs Delaminierung im Bereich der Holzforschung. In der vorliegenden Arbeit wird der Ausdruck ausschließlich in Zusammenhang mit der Verklebung von Holz benutzt. Der Begriff bezeichnet eine eingeschränkte Gebrauchstauglichkeit eines kleinformatigen, laminierten Holzbauteils, die durch eine Auflösung der zunächst vorhandenen Verbindung zweier Fügeiteile im Bereich der Klebefuge ausgelöst wurde.

2.2.1.1 Delaminierungsprüfung

2.2.1.1.1 Methoden

Die Delaminierungsprüfungen haben sich als außerordentlich bedeutsam erwiesen, da sich mit diesen Verfahren sehr schnell Hinweise auf mögliche Verleimungsrisiken gewinnen lassen (Deppe und Schmidt, 2004). Während des Zweiten Weltkrieges haben Truax und Selbo (1948) dieses Kurzzeitprüfverfahren in Nordamerika entwickelt und die Ergebnisse mit Resultaten aus Langzeitversuchen abgeglichen. Die gute Übereinstimmung führte letztendlich dazu, dass dieses Prüfverfahren zur Beurteilung von BSH-Verleimungen eingeführt wurde und inzwischen weltweit verwendet wird. Auch in anderen Bereichen der Holzverleimung, wie zum Beispiel im Flugzeugbau, wird die Delaminierungsprüfung zur Feststellung der Eignung von Klebstoffen verwendet (Vick und Okkonen, 1997). Delaminierungsprüfungen werden mit zwei unterschiedlichen Zielrichtungen durchgeführt: Zum einen wird die Prüfung im Rahmen der Qualitätssicherung von BSH-Herstellern verwendet, zum anderen im Zuge der Zulassung von Klebstoffen, die für die Produktion von tragenden Holzbauteilen vorgesehen sind. Die jeweiligen Prüfverfahren, die hierbei zur Anwendung kommen, unterscheiden sich erheblich hinsichtlich der Intensität der Beanspruchung, des Aufbaus der Prüfkörper und deren Abmessungen. Auf Grund der hohen Bedeutung dieser Verfahren sind die verschiedenen Vorgehensweisen und Leistungsanforderungen weltweit in Normen festgeschrieben (z. B. ASTM D 2559-04; EN 302-2). Allen Verfahren gemeinsam ist eine nach folgendem Grundmuster ablaufende Behandlung der Prüfkörper:

Aus industriell produziertem BSH oder aus speziell hergestellten kleinformatischen BSH-Trägern werden Prüfkörper herausgetrennt. Letztere werden bei Klebstoffzulassungsprüfungen verwendet und müssen hinsichtlich des Aufbaus sowie der Anordnung der Lamellen bestimmte Voraussetzungen erfüllen. Dies ist erforderlich, da die Ergebnisse der Delaminierungsprüfung auch von den Eigenschaften der Lamellen und deren Anordnung abhängig sind. Die Prüfkörper werden in einem Druckkessel bei über 600 kPa (absoluter Druck) weit über den Fasersättigungspunkt hinaus mit Wasser durchtränkt. Anschließend werden die Prüfkörper in einem Trockenofen bei einer bestimmten Luftgeschwindigkeit so lange getrocknet, bis die ursprüngliche Masse wieder erreicht ist. Je nach Zielrichtung der Prüfung wird ein Zyklus, bestehend aus einer Wässerungs- und einer Rücktrocknungsphase, in unterschiedlicher Intensität und Häufigkeit durchgeführt. Eine Gegenüberstellung der verschiedenen Prüfverfahren, die in Europa zur Anwendung kommen, findet sich in Tabelle 1.

Tabelle 1: Verschiedene Delaminierungsverfahren zur Bestimmung der Klebefugenbeständigkeit

Norm	Zielrichtung	Verfahren	Aufbau Prüfkörper	Zyklen	Bedingungen während der Rücktrocknung
EN 302-2	Klebstoffeignung für Klebstofftyp I	I	6 Lamellen mit einer Dicke von 30 mm und liegenden Jahrringen	3	$65 \pm 3 \text{ °C}$ $12,5 \pm 2,5\%$ rel. Luftfeuchte
EN 302-2	Klebstoffeignung für Klebstofftyp II	II	6 Lamellen mit einer Dicke von 30 mm und liegenden Jahrringen	2	$27,5 \pm 3 \text{ °C}$ $30 \pm 5\%$ rel. Luftfeuchte
EN 391	Qualitätskontrolle	A	variabel	2	6 bis 70 °C < 15% rel. Luftfeuchte
EN 391	Qualitätskontrolle	B	variabel	1	$65 \text{ bis } 75 \text{ °C}$ 8 bis 10% rel. Luftfeuchte
EN 391	Qualitätskontrolle	C	variabel	1	$25 \text{ bis } 30 \text{ °C}$ 25 bis 35% rel. Luftfeuchte

Die rasche Änderung der Holzfeuchte bewirkt, dass Druck- und Zugspannungen innerhalb und zwischen den Fügeteilen aufgebaut werden. Diese Spannungen können letztendlich auch zu einer Überschreitung der Klebefugenbeständigkeit und damit zu einer Delaminierung führen. Als Maß für die Klebefugenbeständigkeit wird die Länge der Fugenöffnungen in Bezug zur Gesamtlänge der Klebefuge auf der Hirnholzfläche des Prüfkörpers gesetzt und in Prozent angegeben.

Nach EN 302-2 gehen nur Fugenöffnungen in die Bewertung ein, die einen Kohäsionsriss in der Klebstoffschicht oder einen Bruch direkt zwischen der Klebstoffschicht und der angeklebten Holzlamelle aufweisen. Darüber hinaus werden auch Holzbrüche als Delaminierung gewertet, wenn der Bruch innerhalb der ersten Zellschichten hinter der Klebstoffschicht auftritt und der Verlauf des Bruches weder durch den Faserwinkel noch vom Jahrringverlauf beeinflusst ist.

2.2.1.1.2 Beanspruchung der Klebefuge und Einfluss des Holzes

Im Gegensatz zu anderen Prüfverfahren wird die Klebefuge keinen definierten, externen Spannungen ausgesetzt. Die Beanspruchung der Klebefuge geht vielmehr auf Spannungen zurück, die in Folge der Holzfeuchteänderung entstehen. Die Behandlungszyklen erzeugen in

den Prüfkörpern einen hohen Eigenspannungszustand mit Zugspannungen rechtwinklig zur Fuge und Schubspannungen in der Fugenebene (Aicher und Reinhardt, 2007). Um zumindest das Ausmaß der Spannungen abschätzen zu können, ist es erforderlich, die Faktoren zu kennen, die für die Entstehung und das Ausmaß dieser Beanspruchung verantwortlich sind (Frihart, 2005).

Die in Folge der Holzfeuchteänderung auftretenden Spannungen werden beeinflusst von der Faserorientierung der beiden Fügeteile, den Abmessungen der Holzfügeteile und deren Quell- und Schwindmaße sowie den elastischen Eigenschaften des Holzes und des Klebstoffes (Hofferber et al., 2006). Zudem sind der Umfang der Holzfeuchteänderungen und der Zeitraum, in dem diese erfolgen, von Bedeutung.

Betrachtet man die Holzfeuchte nach der Wässerungsphase, stellt man fest, dass diese weit über den Fasersättigungspunkt ansteigt. Die aufgenommene Wassermenge hängt vor allem von der Holzart ab, da der zur Verfügung stehende Porenraum hierfür maßgeblich verantwortlich ist. So wurde bei Fichtenholz eine Feuchte von etwa 150% und bei Douglasie von etwa 100% gemessen (Schmidt und Knorz, 2010). Die Ausgangsfeuchte der Lamellen innerhalb eines Prüfkörpers beträgt in der Regel 9% bis 14% Holzfeuchte. Diese drastische und kurzfristige Änderung der Feuchte hat zur Folge, dass - ausgelöst durch eine Einlagerung von Wasser in die Zellwände - das Holz in Abhängigkeit der Orientierung und weiterer spezifischer Eigenschaften quillt.

Wird die Verformung des Holzes bei einer Lagerung in Wasser behindert, so entwickeln sich erhebliche Quelldrücke. Der aufgebaute Quellungsdruck ist abhängig von der Temperatur, der Ausgangsfeuchte, der Holzart und der anatomischen Orientierung (z. B. Perkitny und Kingston, 1972). Bei Buchenholz sind vergleichsweise hohe Drücke zu beobachten. Lagert man darrtrockenes Buchenholz für mehrere Stunden in Wasser, ergeben sich bei vollständiger Behinderung der Quellung maximale Quellungsdrücke in radialer Richtung von bis zu 5,0 N/mm² und in tangentialer Richtung von bis zu 3,5 N/mm². Für Fichte und Kiefer wurden deutlich geringere Spannungen gemessen: In radialer Richtung lagen die maximalen Spannungen für Fichte und Kiefer bei etwa 1,20 N/mm² und in tangentialer Richtung bei rund 1,5 N/mm² (Keylwerth, 1962).

Die genannten maximalen Spannungen werden aber bei der Delaminierungsprüfung nicht erreicht, da die Ausgangsfeuchte der Lamellen höher ist und zudem keine vollständige Behinderung der Quellung vorliegt. Darüber hinaus erscheint es denkbar, dass die Quellung des

Holzes im Bereich der Grenzfläche Holz-Klebstoff durch das Eindringen des Klebstoffes eingeschränkt ist. Diese von Frihart (2009) aufgestellte Hypothese geht auf die im Zusammenhang mit der Verwendung von Voranstrichen (Primern) beobachteten Verbesserung der Klebefugenbeständigkeit zurück. Bei Scherfestigkeitsuntersuchungen an geklebten Verbindungen mit Epoxidharzen, die im nassen Zustand geprüft wurden, waren die Holzbruchanteile stets geringer als bei vergleichbaren Prüfungen im trockenen Zustand oder nach Wässerung und anschließender Rücktrocknung. Insbesondere bei den von Frihart (2005) untersuchten nordamerikanischen Laubhölzern waren die Holzbruchanteile deutlich geringer. Nach einer mikroskopischen Untersuchung der Bruchbilder zeigte sich, dass es im Bereich der Grenzfläche durch das Quellen der Zellwände zu einer intensiven Beanspruchung der Klebeverbindung kam. Auch bei Delaminierungsprüfungen wurde mehrfach festgestellt, dass Epoxidharze die Anforderungen nicht erfüllen können. Es kam wiederholt zu großen Fugenöffnungen. Eine deutliche höhere Delaminierungsbeständigkeit wurde hingegen erzielt, wenn die Füge-teile vor der Verklebung mit einem Primer auf der Basis von Hydroxymethyl-Resorcinol (HMR) behandelt wurden (Vick et al., 1995; Vick und Okkonen, 1998). Auch mit MUF basierten Primern wurde ein höherer Holzbruchanteil bei Scherfestigkeitsprüfungen erreicht (Chandler und Frihart, 2005). Die Vorbehandlung der Füge-teile führte bei Epoxidharzen, aber auch bei PUR-Klebstoffen zu Verbesserungen. Dass sich die Delaminierungsbeständigkeit auch bei MUF-Klebstoffen mit Hilfe eines HRM-Primers erhöhen lässt, konnten López-Suevos und Richter (2008) zeigen.

Vick et al. (1995) vermuten, dass die erzielten Verbesserungen auf kovalente Bindungen sowie Wasserstoffbrückenbindungen zwischen Holz und Primer bzw. kovalente Bindungen zwischen Klebstoff und Primer zurückzuführen sind: Die engere Vernetzung zwischen den drei Komponenten erhöht letztendlich die Beständigkeit. Frihart (2009) geht hingegen davon aus, dass die positive Wirkung des Primers durch eine Stabilisierung der Zellwände ausgelöst wird. Im Gegensatz zu den prä-polymerisierten Klebstoffen, zu denen auch die Epoxidharze zählen, vermag der Primer in die Zellwände einzudringen, wodurch das Quellen des Holzes reduziert wird und so weniger Spannungen im Bereich der Grenzfläche auftreten. Die eigentliche Beanspruchung der Klebefuge reduziert sich hierdurch und es kommt zu einer höheren Fugenbeständigkeit. Da es MUF-Klebstoffen im noch unvernetzten Zustand ebenfalls möglich ist, in Zellwände einzudringen (z. B. Gindl et al., 2002), wird auch hier eine Stabilisierung erwartet (Frihart, 2009).

Es wurde bereits erwähnt, dass die Quellung von der anatomischen Orientierung des Holzes abhängt. Oftmals gibt es innerhalb eines Fügeteils nicht nur eine vorherrschende Orientierung sondern zumeist eine Mischung, was beim Quellen zum Verziehen des Holzes führt. Die ungleichmäßigen Dimensionsänderungen führen zu komplexen Beanspruchungssituationen für die jeweilige Klebefuge. In Abbildung 1 sind zwei verschiedene Anordnungen von Lamellen mit liegenden Jahrringen vor und nach der Wasserlagerung schematisch dargestellt. Je nach Anordnung der Lamellen innerhalb eines Prüfkörpers wirken vorwiegend Druckspannungen auf die Fuge ein (Lamellenanordnung a) oder es kommt zu einer Kombination aus Druck- und Zugspannungen (Lamellenanordnung b). Bei der Durchführung von Delaminierungsprüfungen im Rahmen von Klebstoffprüfungen werden die Lamellen in Europa (EN 302-2) mit einheitlicher Orientierung (Lamellenanordnung a) und in Nordamerika (ASTM D 25509-04) alternierend angeordnet (Lamellenanordnung b). Dies schränkt die Vergleichbarkeit vieler Untersuchungen ein.

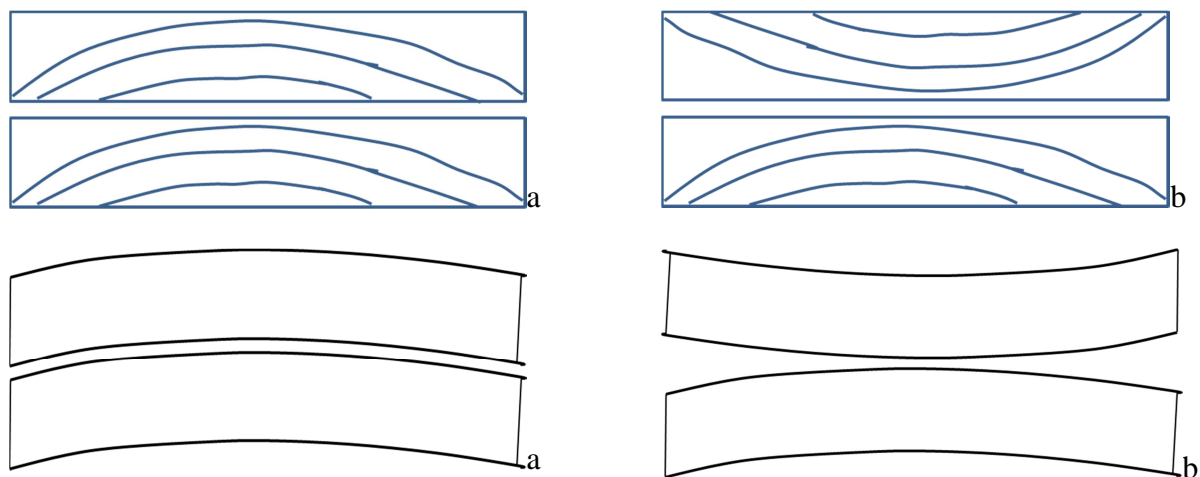


Abbildung 1: Auswirkung der Quellung bei Lamellenanordnung a (links) und b (rechts); oben: Zustand vor der Wasserlagerung, unten: idealisierte Verformung der Lamellen nach der Wasserlagerung bei unbehinderter Quellung

Im Anschluss an die Tränkung mit Wasser erfolgt bei der Delaminierungsprüfung die Rücktrocknung der Prüfkörper. Während die Randbereiche schnell trocknen, sind die inneren Bereiche des Prüfkörpers immer noch wassergesättigt bzw. die Holzfeuchte liegt noch über dem Fasersättigungspunkt. Dieser Holzfeuchtegradient führt unter anderem zu Zugspannungen rechtwinklig zur Fugenebene. In Abbildung 2 ist ein Prüfkörper während der Rücktrocknungsphase skizziert.

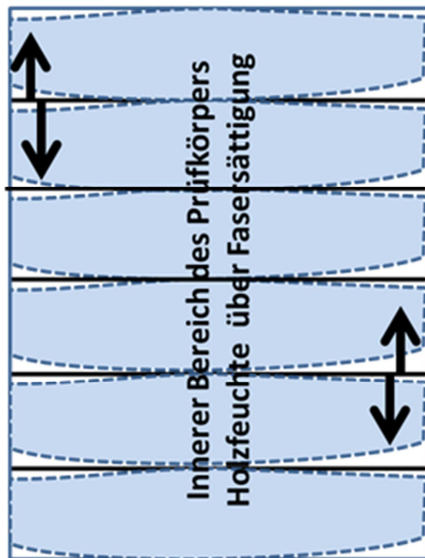


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Prüfkörpers (Sicht auf Schmalseite); Pfeile stellen die Zugspannungen quer zur Faser dar, die auf die Klebefugen bei der Rücktrocknung wirken

Dieser auftretende Holzfeuchtegradient und die damit einhergehenden Beanspruchungen der Klebefugen sind abhängig von der Holzart. Ein Vergleich zwischen Prüfkörpern aus Fichten- und Douglasienholz hat gezeigt, dass die Trocknung unterschiedlich abläuft und damit auch Auswirkungen auf die Verteilung und Dauer der auftretenden Spannungen zu erwarten sind (Schmidt und Knorz, 2010). Für die Beanspruchung der Klebefuge ist zudem von Bedeutung, dass die sich einstellenden Spannungen abhängig von der Holzdicke sind. Mit steigender Dicke nehmen die Spannungen zu, was dazu führen kann, dass ein Klebstoff beispielsweise für Kiefernholz eine ausreichende Fugenbeständigkeit besitzt, es hingegen bei Klebeverbindungen zwischen Fügeteilen aus Eichenholz zu größeren Fugenöffnungen kommen kann (Marra, 1992).

Darüber hinaus hängt die Beanspruchung der Klebefugen auch von der Jahrringlage der Lamellen ab. Marra (1992) geht davon aus, dass diese zwischen Lamellen mit stehenden Jahrringen höher ist als bei Lamellen mit liegenden Jahrringen. Ursächlich hierfür sollen die höheren Schwindmaße in Richtung der Lamellendicke sein. Hohe Spannungen erwartet Marra (1992) auch, wenn Fügeteile mit liegenden und stehenden Jahrringen miteinander verklebt werden, da neben den Normal- zusätzlich Scherspannungen auftreten. Systematisch untersucht haben Nestic und Milner (1991) die Höhe der Normal- und Scherspannungen. Für verschiedene Lamellenanordnungen wurden auf der Basis der Finite-Element-Methode die Spannungen berechnet, die im Bereich der Klebefuge wirken. Unterstellt wurde eine einheitliche

Holzfeuchtereduzierung (1% Änderung der Holzfeuchte) bei der Holzart Mountain Ash (*Eucalyptus regnans* F. MUELL.). Zwischen Lamellen mit stehenden Jahrringen berechneten Nestic und Milner (1991) Normal- und Scherspannungen, die sich unter $0,5 \text{ N/mm}^2$ bewegten. Hingegen waren die Spannungen im Bereich der Klebefuge zwischen Lamellen mit liegenden Jahrringen und der Lamellenanordnung a) (vgl. Abbildung 1) deutlich höher. Die größten Spannungen wurden von Nestic und Milner (1991) für den Fall berechnet, dass sich die Markröhre in unmittelbarer Nähe oder im Bereich der Klebefuge befindet. Insbesondere die Normalspannung bewegte sich in diesem Fall zwischen $1,0$ und $2,0 \text{ N/mm}^2$.

Systematisch untersucht wurde der Einfluss von Jahrringlage und Markröhre auf die Delaminierungsprüfung bei Fichte von Pitzner-Scheffer (1999). Prüfkörper, deren Lamellen die Markröhre beinhalteten, zeigten sehr große Fugenöffnungen. Auch wurde eine Abhängigkeit der Delaminierung von der Jahrringlage festgestellt. Waren die Prüfkörper aus Füge-teilen mit liegenden Jahrringlagen aufgebaut, so war die Delaminierung im Vergleich zu Prüfkörpern, die aus Lamellen mit stehenden Jahrringen zusammengesetzt waren, höher. Inwieweit hier ein Widerspruch zu den Annahmen von Marra (1992) zu sehen ist, der eine höhere Beanspruchung der Klebefuge zwischen Lamellen mit stehenden Jahrringen vermutet, lässt sich nicht abschließend beurteilen. Vorstellbar ist allerdings, dass die erzeugten Spannungen bei Füge-teilen mit stehenden Jahrringen tatsächlich geringer sind, da es während der Rück-trocknung zu ausgeprägten Trocknungsrisen in radialer Richtung kommt. Verlaufen diese Risse parallel zur Klebefuge, so könnte die Klebefuge hierdurch entlastet werden. In Abbildung 3 sind Prüfkörper mit stehenden und liegenden Jahrringen nach erfolgter Trocknungsphase abgebildet.

Pitzner-Scheffer (1999) kommt zu dem Schluß, dass man die Ergebnisse der Delaminierungsprüfung immer unter Berücksichtigung des Aufbaus der Prüfkörpers interpretieren muss. Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse ist nur dann sichergestellt, wenn der Aufbau der Prüfkörper einheitlich erfolgt und die ausgewählten Füge-teile in ihren Eigenschaften möglichst ähnlich sind.

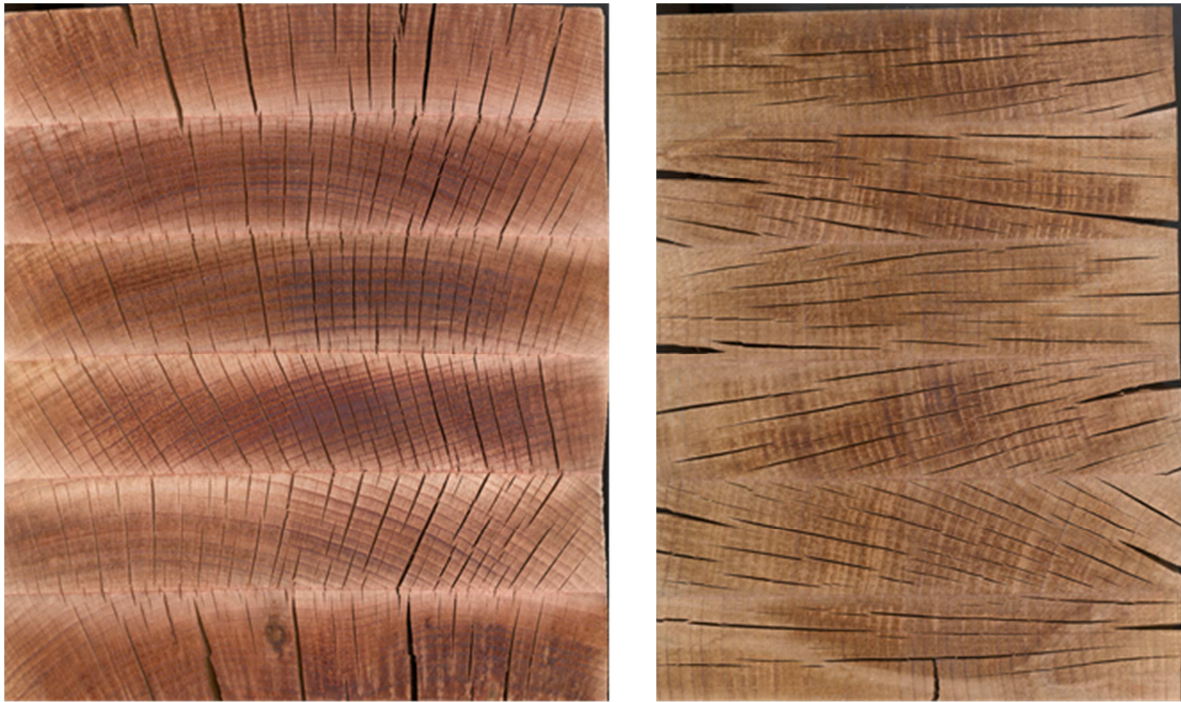


Abbildung 3: Trocknungsrisse in Prüfkörpern aufgebaut aus Lamellen mit liegenden (links) und stehenden (rechts) Jahrringen

2.2.1.1.3 Prüfverfahren und baurechtliche Vorgaben

Klebstoffe, die in Europa in tragenden Konstruktionen Verbindungsaufgaben übernehmen sollen, müssen zuvor umfangreiche Leistungsanforderungen erfüllen. Für Polykondensationsklebstoffe auf Phenoplast- und Aminoplast-Basis sind diese in der EN 301 normiert. Hierin wird zwischen zwei Klebstofftypen unterschieden (Typ I und Typ II), die für den Einsatz in verschiedenen Klimabedingungen geeignet sind. Während Klebstoffe des Typs I ursprünglich für anspruchsvolle Verklebungen im Außen- und Innenbereich konzipiert wurden, sind unter Typ II Klebstoffe zusammengefasst, die man ausschließlich im Innenbereich verwenden darf. Seit dem Einsturz der Dachkonstruktion der Eislaufbahn in Bad Reichenhall im Jahr 2006 dürfen in Deutschland unabhängig vom tatsächlichen Einsatzbereich des Holzbauteils nur noch Klebstoffe des Typs I verwendet werden. Die auf den entsprechenden Klebstofftyp abgestimmten Prüfverfahren sind in der EN 302, Teil 1 bis 4 festgelegt. Die einzige Prüfung, die explizit den Einfluss der Holzart integriert und letztendlich die Basis für eine holzartenspezifische Zulassung des Klebstoffes bildet, ist die Delaminierungsprüfung nach EN 302-2.

Die Delaminierungsprüfungen nach EN 302-2 sind in Tabelle 1 (vgl. Kapitel 2.2.1.1.1) dargestellt. Da man in Deutschland nur noch Klebstoffe des Typs I verwenden darf, ist das Ver-

fahren II nach EN 302-2 mittlerweile unbedeutend und wird hier nur noch im Hinblick auf bereits erzielte Forschungsergebnisse aufgeführt. Die Verfahren nach EN 391 sind nur für die Qualitätssicherung von BSH von Bedeutung.

Bereits Truax und Selbo (1948) stellten fest, dass die Ergebnisse der Delaminierungsprüfung nicht nur von der allgemeinen Verklebungsqualität, sondern auch von der jeweiligen Holzart beeinflusst werden. Wie bereits erwähnt, können bei gleicher Verklebungsqualität Unterschiede in der Rohdichte, im anatomischen Aufbau des Holzes und der Zusammensetzung des Prüfkörpers die Ergebnisse entscheidend beeinflussen (vgl. Kapitel 2.2.1.1.2). In der zur EN 302-2 korrespondierenden amerikanischen Norm ASTM D 2559-04 werden daher höhere Delaminierungen akzeptiert, wenn die Eignung eines Klebstoffes für Laubhölzer mit hoher Dichte getestet wird. In der EN 301 gibt es bisher keine holzartenspezifischen Leistungsanforderungen an die Klebstoffsysteme. Soll ein Klebstoffsystem für die Verklebung von Buchenholz in Deutschland baurechtlich zugelassen werden, so muss der Klebstoff die Delaminierungsprüfung nach EN 302-2 Verfahren I durchlaufen und die Anforderungen nach EN 301 erfüllen.

2.2.1.1.4 Ergebnisse für Buchenholz

Bisher wurde die Delaminierungsprüfung zur Beurteilung der Klebefugenbeständigkeit zwischen Fügeteilen aus Buchenholz in Untersuchungen von Frühwald et al. (2003), Aicher und Reinhardt (2007) sowie Ohnesorge et al. (2010) herangezogen. Gemeinsames Ziel dieser Arbeiten war es, Informationen über das Verklebungsverhalten von Buchenholz und die Beständigkeit der Leimfugen zu gewinnen. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurde eine Vielzahl von Parametern variiert, wie zum Beispiel Klebstofftyp, Prüfkörperabmessung, Jahrringlage, Prüfverfahren und Klebetechnologie. Aicher und Reinhardt (2007) sowie Ohnesorge et al. (2010) versuchten zudem zu ermitteln, welchen Einfluss der Buchenrotkern auf die Fugenbeständigkeit hat. In allen Untersuchungen wurden handelsübliche Klebstoffsysteme verwendet und der Pressdruck auf Grund der höheren Dichte des Holzes erhöht.

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die untersuchten Einflussfaktoren und die verwendeten Prüfverfahren. Im Hinblick auf eine baurechtliche Zulassung sind die Resultate von Ohnesorge et al. (2010) ohne Bedeutung, da ein Verfahren mit einer geringen Beanspruchungsintensität gewählt wurde (vgl. Kapitel 2.2.1.1.1). Die Untersuchung von Frühwald et al. (2003) erlaubt hingegen weitergehende Aussagen. Vor dem Hintergrund der bau-

rechtlichen Vorgaben in Deutschland ist die Arbeit von Aicher und Reinhardt (2007) maßgeblich.

Tabelle 2: Vergleich bisheriger Arbeiten im Hinblick auf die untersuchten Parameter

	angewandtes Prüfverfahren	Klebstoffe	Lamellen-abmessung	sonstige Parameter
Frühwald et al. (2003)	EN 391 Verfahren B	MUF, PUR, PRF	Breite: 150 mm Dicke: 18, 24 und 30 mm	-
Aicher und Reinhardt (2007)	EN 302-2 Verfahren I und II	MUF, PUR	Breite: 90-130 mm Dicke: i.d.R. 36 mm	Rotkernigkeit, geschlossene Wartezeit
Ohnesorge et al. (2010)	EN 391 Verfahren C	MUF	Breite: 120 mm Dicke: 29, 35 und 38 mm	Rotkernigkeit, Vorbehandlung mit HMR-Primer, geschlossene Wartezeit, Jahrringlage

Da die Herstellung der Prüfkörper und deren Prüfung mit erheblichem Aufwand verbunden sind, wurden in den oben genannten Arbeiten für jede Parameterkombination keine oder nur wenige Wiederholungen durchgeführt. Damit haben diese Untersuchungen in weiten Teilen den Charakter von Voruntersuchungen. Zusätzlich begrenzt wird die Aussagekraft durch die beim Aufbau der Prüfkörper verwendeten Lamellen. Hinlänglich bekannt ist, dass die Dicke der Lamellen einen erheblichen Einfluss auf die Beanspruchung der Klebefuge hat (z. B. Truax und Selbo, 1948), weshalb deren Beschränkung von Leimholzherstellern als wesentliches Element zur Verbesserung der Klebefugenbeständigkeit angesehen wird (Ohnesorge et al., 2009a). Dennoch wurden in der Untersuchung von Aicher und Reinhardt (2007) sowie Ohnesorge et al. (2010) fast ausschließlich Lamellen mit Dicken über 30 mm verwendet. Zudem wurden die Prüfkörper hinsichtlich der Jahrringlage nicht systematisch aufgebaut. Die Lamellen eines Prüfkörpers wurden ohne Berücksichtigung der jeweiligen Jahrringlage miteinander verklebt. Ohnesorge et al. (2010) versuchten diesen wichtigen Einflussfaktor nachträglich über statistische Methoden zu quantifizieren.

Zusammenfassend lässt sich, unter Beachtung der gewählten Methodik und der zum Teil geringen Aussagekraft, Folgendes aus den Arbeiten ableiten:

- Zwischen den Klebstofftypen zeigen sich erhebliche Unterschiede. Die verwendeten PUR-Klebstoffe erreichten immer nur eine geringe Beständigkeit, während der untersuchte PRF-Klebstoff und die beiden MUF-Leime tendenziell bessere Resultate erbrachten (Aicher und Reinhardt, 2007; Frühwald et al., 2003).
- Nur bei Prüfkörpern ohne Farbverkernung und bei Verwendung eines MUF-Leims werden die Anforderungen an den Klebstofftyp II erbracht (Aicher und Reinhardt, 2007). Allerdings reicht dies nicht aus, um die baurechtlichen Vorgaben für die Anerkennung eines Klebstoffes zu erfüllen. Die Fugenöffnungen, die Frühwald et al. (2003) feststellten, übersteigen zwar den Grenzwert von 5%, jedoch sind die Resultate deutlich besser als die von Aicher und Reinhardt (2007).
- Der Buchenrotkern hat auf die Fugenbeständigkeit keinen eindeutigen Einfluss. Während Ohnesorge et al. (2010) keinerlei Beeinträchtigungen beobachteten, stellten Aicher und Reinhardt (2007) einen deutlichen Einfluss fest: Keine Parameterkombination konnte die Leistungsanforderungen erfüllen, wenn die Prüfkörper aus rotkernigen Lamellen aufgebaut waren.
- Die Länge der geschlossenen Wartezeit wirkt sich in Abhängigkeit vom Klebstofftyp unterschiedlich aus. Bei dem von Aicher und Reinhardt (2007) verwendeten MUF-Klebstoff kam es bei einer längeren geschlossenen Wartezeit tendenziell zu besseren Resultaten. Insbesondere verbesserte sich die Beständigkeit bei Klebefugen zwischen rotkernigen Lamellen. Der PUR-Klebstoff zeigte keine eindeutige Reaktion auf verlängerte Wartezeiten. Geringere Delaminierungen beobachteten auch Ohnesorge et al. (2010), wenn die Pressung nach längeren geschlossenen Wartezeiten einsetzte.
- Die Jahrringlage hat ebenfalls einen Einfluss auf die Ergebnisse. Bei stärkeren Lamellen wirkten sich liegende Jahrringe besonders ungünstig aus, während

Klebeverbindungen zwischen Lamellen mit stehenden Jahrringen geringere Öffnungen aufwiesen (Ohnesorge et al., 2009b).

- Je größer die Abmessungen der Lamellen, desto größer ist die beobachtete Fugenöffnung. Aicher und Reinhardt (2007) stellten einen Zusammenhang zwischen der Fugenöffnung und der Lamellenbreite fest. Ohnesorge et al. (2010) und Frühwald et al. (2003) beobachten bei dickeren Lamellen eine deutlich höhere Delaminierung.

2.2.1.2 Scherfestigkeit

2.2.1.2.1 Methoden

Neben Prüfungen, die es zum Ziel haben, die Klebefugenbeständigkeit in Kurzzeit- oder Langzeitversuchen zu bestimmen, bedarf es auch Prüfverfahren zur schnellen Einschätzung der erzielten Verklebungsqualität. Ein weit verbreitetes Verfahren hierfür ist die Scherfestigkeitsuntersuchung nach EN 392, mit deren Hilfe sich die Güte der Klebeverbindung mit geringem Aufwand bestimmen lässt. Regelmäßig wird dieses Verfahren daher zur Qualitätssicherung in Leimholzbetrieben herangezogen. Obwohl bei dieser Kurzzeitprüfung die Klebeverbindung keinen wechselnden klimatischen Beanspruchungen ausgesetzt wird, gehen Zeppenfeld und Grunwald (2005) trotzdem davon aus, dass zwischen den Ergebnissen der Delaminierungs- und der Scherfestigkeitsprüfung ein Zusammenhang besteht: Eine geringe Delaminierungsbeständigkeit einer Klebefuge spiegelt sich demnach auch in einer geringen Scherfestigkeit wider.

Die für die Prüfung erforderlichen Prüfstäbe werden mit bestimmten Abmessungen aus einem BSH-Träger herausgetrennt und in eine Schervorrichtung eingesetzt, so dass die Faserichtung des Holzes mit der Krafrichtung übereinstimmt und die Scherebene im Bereich der Leimfuge verläuft. Eine ausreichende Verklebungsqualität wird unterstellt, wenn eine bestimmte Mindestfestigkeit und zudem ein definierter Holzfaserbruchanteil erreicht wird. Je geringer die Scherfestigkeit ist, desto höher muss der Faserbruchanteil sein (EN 386). Beispielsweise werden bei Festigkeiten von 6 N/mm² Bruchanteile von mindestens 100% gefordert. Übersteigt die Scherfestigkeit einen Wert von 10 N/mm², reichen hingegen Faserbruchanteile von 15% aus.

Steiger et al. (2010) verweisen darauf, dass diese Prüfmethode mit einer Reihe von Unzulänglichkeiten verbunden ist. Bemängelt wurden insbesondere die ungleichmäßige Verteilung

der aufgetragenen Last, die Vielzahl der unterschiedlichen Prüfeinrichtungen und Fehler, die durch eine ungenaue Handhabung auftreten. Allerdings wird das Testverfahren selbst nicht in Frage gestellt, sondern eine Weiterentwicklung der Prüfeinrichtung beschrieben, welche die Mängel weitestgehend beseitigen soll.

2.2.1.2.2 Ergebnisse für Buchenholz

Zur Einschätzung der Eignung verschiedener Klebstoffe zur Verklebung von Buchenholz wurden von Walther (2002) in größerem Umfang Scherfestigkeitsprüfungen durchgeführt. Unter den insgesamt acht untersuchten Klebstoffen befanden sich auch zwei handelsübliche MUF-Klebstoffe. Als weitere unabhängige Variable wurde der Faktor Holz in den Ausprägungen rotkernig und unverkernt⁵ in die Untersuchung einbezogen. Hinsichtlich der Klebtechnologie wurden einheitliche Parameter gewählt; nach einer offenen Wartezeit von zehn Minuten wurden die Lamellen gefügt und verpresst.

Es zeigte sich, dass die Scherfestigkeiten für beide MUF-Klebstoffe, sowohl bei unverkernter (Mittelwert 15,7 N/mm² bzw. 16,2 N/mm²) als auch bei rotkerniger (Mittelwert 13,4 N/mm² bzw. 15,9 N/mm²) Buche, hoch waren. Jedoch unterschieden sich die Holzfasbruchanteile deutlich. Während sich für Klebefugen zwischen unverkernten Fügeteilen immer hohe Anteile ergaben, waren diese für rotkernige gering, so dass die Leistungsanforderungen trotz hoher Scherfestigkeiten regelmäßig unterschritten wurden. Es wurden mittlere Holzfasbruchanteile von 3% bzw. 46% festgestellt. Aus den Ergebnissen wurde die Vermutung abgeleitet, dass eine fakultative Farbverkernung des Holzes die Adhäsion beeinflusst.

Aicher und Reinhardt (2007) führten neben Delaminierungs- auch Scherfestigkeitsprüfungen durch. Für alle Prüfkonfigurationen und Parameterkombinationen wurden durchwegs hohe Scherfestigkeiten erzielt. Leider geben Aicher und Reinhardt (2007) die dazugehörigen Holzfasbruchanteile nicht an, so dass ein Vergleich der Ergebnisse mit der Arbeit von Walther (2002) nicht möglich ist.

Auch Ohnesorge et al. (2010) entnahmen Prüfkörper für Scherfestigkeitsuntersuchungen aus BSH-Trägern, die im Labor oder in einem Leimholzbetrieb unter Praxisbedingungen hergestellt wurden. Nahezu alle Klebeverbindungen erfüllten die Anforderungen hinsichtlich Festigkeit und Faserbruchanteil. Nur bei wenigen Fugen wurden trotz hoher Festigkeiten geringe Holzbruchanteile festgestellt. Ein statistischer Zusammenhang zwischen den

⁵Der Begriff wird in dieser Arbeit synonym für nicht farbkerniges Holz verwendet, das sich außerhalb eines Spritz- oder Rotkerns befindet.

Ergebnissen der Scherfestigkeitsprüfungen und einer vorhandenen Rotkernigkeit sowie variierenden geschlossenen Wartezeiten wurde nicht festgestellt.

2.3 Verfestigen der Leimfuge in Abhängigkeit verklebungsrelevanter Holzeigenschaften

2.3.1 Abbinden

In der Literatur wird im Zusammenhang mit der Verklebung wiederholt auf die Bedeutung der Wasseraufnahme durch das Holz hingewiesen. Diese Erkenntnis wird aus Untersuchungen abgeleitet, die bei verschiedenem Holzfeuchten durchgeführt wurden. Bei erhöhter Holzfeuchte und einer damit einhergehenden geringeren Wasseraufnahme des Holzes verlängert sich beispielsweise auch das Verfestigen von UF-Klebefugen (z. B. Pillar, 1966; Properzi et al. 2003). Das Verfestigen der in dieser Arbeit betrachteten MUF-Klebstoffe setzt sich zusammen aus einer Polykondensation und dem physikalischen Abbinden des PVAc-Anteils (vgl. Kapitel 2.1). Dieser Anteil verfestigt erst mit dem Entweichen des Dispersionsmittels (z. B. Wasser) aus der Klebefuge.

Während im Verlauf der offenen Wartezeit die Abgabe an die Umgebungsluft eine wichtige Rolle spielt, tritt während der geschlossenen Wartezeit die Evaporation in den Hintergrund und die Wasseraufnahme des Holzes ist die bestimmende Größe für das Entweichen des Wassers aus der Fuge. Die Aufnahme von Wasser in flüssigem Zustand erfolgt primär durch adsorptive Bindung und kapillaren Aufstieg. Die Adsorption wird durch hydrophile Gruppen in der Holzsubstanz ausgelöst, die ein starkes Dipolmoment besitzen und damit eine starke Anziehungskraft auf das Dipolmolekül des Wassers ausüben. Die kapillare Wasseraufnahme wird von der Grenzflächenspannung und dem Radius der Kapillaren beeinflusst. Sowohl die adsorptive als auch die kapillare Aufnahme ist holzartenspezifisch. Darüber hinaus beeinflussen vorhandene Feuchte, Inhaltsstoffe und anatomische Orientierung die Wasseraufnahme des Holzes. So ist in tangentialer oder radialer Richtung der Wassertransport deutlich geringer als in axialer Richtung, da die anatomischen Strukturen hierfür nicht ausgelegt sind (z. B. River et al., 1991). In der Literatur finden sich eine Vielzahl von komplexen Modellen, die versuchen, die Wasseraufnahme des Holzes zu beschreiben.

Die Möglichkeit eines Stoffes, Wasser in flüssiger Form aufzunehmen, wird durch den sogenannten Wasseraufnahmekoeffizienten charakterisiert. Dieser Materialkennwert beschreibt das Vermögen eines Stoffes, innerhalb eines bestimmten Zeitraumes eine gewisse Masse an Wasser aufzunehmen. Der Kennwert wird mittels eines standardisierten Verfahrens und einer festgelegten Berechnungsmethode bestimmt (DIN EN 15148).

Boehme und Hora (1996) haben die Wasseraufnahme über die tangentialen Holzoberfläche für insgesamt 18 Holzarten ermittelt. Auch für die Verklebung von Buchenholz ist die Wasseraufnahme in dieser Richtung von besonderer Bedeutung, da das Schnittholz aufgrund der gängigen Einschnitttechnik überwiegend liegende Jahrringe aufweist (Hapla und Ohnesorge, 2005). In Tabelle 3 sind die mittleren Wasseraufnahmekoeffizienten aus der Untersuchung von Boehme und Hora (1996) für einige ausgewählte Holzarten aufgelistet. Die Messungen wurden für jede Holzart an jeweils drei Prüfkörpern vorgenommen. Darüber hinaus wurden in Tabelle 3 die Resultate einer neueren Untersuchung von Sonderegger et al. (2012) integriert. Sie ermittelten die Koeffizienten an jeweils acht bis zehn Prüfkörpern je Holzart.

Übereinstimmend wurde in beiden Arbeiten festgestellt, dass Buchenholz einen vergleichsweise hohen Koeffizienten besitzt. In der Untersuchung von Boehme und Hora (1996) wurde für keine andere Holzart ein solch hoher Wert berechnet. Für farbkerniges Buchenholz liegt bisher kein derartiger Materialkennwert vor.

Boehme und Hora (1996) fanden bei den untersuchten Holzarten einen gewissen Zusammenhang zwischen niedriger Dichte des Holzes und einem erhöhten Wasseraufnahmekoeffizienten. Eine statistische Absicherung war allerdings nicht möglich, da bei einigen Holzarten mit hoher Dichte sowohl niedrige als auch sehr hohe Koeffizienten wiederholt zu beobachten waren. Boehme und Hora (1996) führen diese Schwankungen auf hydrophobe Extraktstoffe zurück, die eine Wasseraufnahme reduzieren.

Tabelle 3: Wasseraufnahmekoeffizienten w_t verschiedener Holzarten über die tangentielle Oberfläche

Holzart	Boehme und Hora (1996)		Sonderegger et al.(2012)	
	Dichte ⁶ in g/cm ³	w_t in kg /m ² h ⁻¹ _{0,5}	Rohdichte in g/cm ³	w_t in kg /m ² h ⁻¹ _{0,5}
Western Redcedar	0,300	0,0158		
Teak	0,749	0,0426		
Lärche	0,660	0,0908		
Fichte	0,524	0,1526	0,517	0,0924
Buche	0,692	0,2704	0,680	0,1758
Esche			0,636	0,2082

2.3.2 Aushärten

Die Abläufe während des Aushärtens des Klebstoffes können maßgeblich durch die chemischen Eigenschaften des Fügeteils beeinflusst werden. In Abhängigkeit vom verwendeten Klebstoffsystem und den spezifischen Holzeigenschaften kann das Aushärten entweder inhibiert (z. B. Kehr, 1962) oder beschleunigt (z. B. Dix und Roffael, 1995) werden.

In einer Vielzahl von Studien wurde wiederholt festgestellt, dass die Extraktstoffe über ihren pH-Wert und die Pufferkapazität einen Einfluss auf das Verfestigen säurehärtender Klebstoffe ausüben (z. B. Plath, 1953; Narayanamurti, 1957; River et al., 1991; Pedieu et al., 2008). Die extrahierbaren Stoffe bestimmen zwar die chemischen Eigenschaften des Holzes mit und wirken sich auch auf das Verfestigen aus, allerdings nicht ausschließlich. Für die Verklebung von pH-sensitiven Klebstoffen ist die Acidität des Holzes von großer Bedeutung für die Aushärtung (z. B. Rowell, 1984; Marra, 1992). Die Acidität wird nicht nur durch den pH-Wert und die Pufferkapazität von wässrigen Auszügen, sondern auch durch den Gehalt organischer Säuren sowie der Menge flüchtiger organischer Säuren charakterisiert (z. B. Schneider et al., 2000). Die Bedeutung der nicht löslichen sauren Bestandteile des Holzes auf das Aushärten wird erstmals von Subramanian et al. (1983) dargestellt. Dass darüber hinaus die flüchtigen Säuren ebenfalls einen Einfluss haben, wurde beispielsweise von Poblete und Roffael (1985) gezeigt. Zur Bildung flüchtiger Säuren kommt es besonders dann, wenn Holz hohen Temperaturen über einen längeren Zeitraum ausgesetzt wird (Packman, 1960). Die Menge und die Zusammensetzung der gebildeten Säuren hängen von der Temperatur, deren Einwirkungsdauer und der Holzart ab. Die temperaturbedingte Bildung von Säuren ist insbesondere bei

⁶ Nicht genauer spezifiziert.

der Herstellung von Span- und Faserplatten zu beachten, da während des Pressvorgangs die gestreute Matte mit hohen Temperaturen beaufschlagt wird. Bei der Kaltverklebung von Vollholz ist die Entwicklung zusätzlicher organischer Säuren hingegen nicht zu erwarten und kann daher in der Regel vernachlässigt werden. Auch bei der Verwendung von Hochfrequenzpressen wird das Holz nur geringfügig erwärmt. Die durch eine Dipolbewegung des Wassers ausgelöste Wärmeentwicklung führt vor allem zu einem Temperaturanstieg innerhalb der Leimfuge; das umgebende Holz wird nur geringfügig erwärmt.

2.3.2.1 Extraktstoffe

Aus chemischer Sicht werden unter dem Begriff Extraktstoffe eine Vielzahl von Substanzen verschiedener Stoffklassen subsummiert, die mit unterschiedlichen Lösungsmitteln und Verfahren aus dem Holz extrahierbar sind (z. B. Fengel und Wegener, 1989). Teilweise werden die Extraktstoffe auch nach der verwendeten Methode, dem jeweiligen Lösungsmittel oder deren Kombination kategorisiert. Der Gehalt und die Zusammensetzung der Extraktstoffe variieren intra- und interspezifisch teilweise erheblich und bestimmen die Gebrauchseigenschaften der Hölzer mit (z. B. Fengel und Wegener, 1989). Intraspezifische Variationen haben beispielsweise Auswirkungen auf die natürliche Dauerhaftigkeit (Windeisen et al., 2002), aber auch auf die Verleimbarkeit (Roffael und Rauch, 1974). Die Extraktstoffe beeinflussen über die jeweilige Menge und Zusammensetzung den pH-Wert und die Pufferkapazität des Holzes, die wiederum für das Aushärten einiger Klebstoffsysteme relevant sind (Sellers et al., 1988; River et al., 1991; Radovic, 2005).

Unter der Vielzahl der Extraktstoffe, die aus dem Holz gelöst werden können, haben die wässrigen Extrakte das größte Potential, das Aushärten von säurehärtenden Kondensationsklebstoffen zu beeinflussen. Die Alkohol-Benzol-Extrakte und die mit Ethylether löslichen Begleitstoffe vermögen die Aushärtung nicht in vergleichbarem Ausmaß zu beeinflussen (Narayanamurti et al., 1962; Popper, 1974). Auch wurde beobachtet, dass die Inhaltsstoffe in Abhängigkeit vom Extraktionsverfahren sehr unterschiedlich auf die Aushärtung wirken. Albritton und Short (1979) sowie Slay et al. (1980) extrahierten mit Ethanol und Wasser die akzessorischen Bestandteile aus fünf nordamerikanischen Harthölzern und untersuchten deren Wirkung auf das Aushärten von UF-Klebstoffen. Hierfür wurden eine bestimmte Menge (Albritton und Short, 1979) oder die gesamte Menge (Slay et al., 1980) der gewonnenen Extraktstoffe einem UF-Harz beigemischt und die Gelierzeit gemessen (vgl. Kapitel 2.5.4). Es zeigte sich, dass die wasserlöslichen Extraktstoffe unabhängig von der beigemischten Menge, zu einer relativen Verlängerung der Gelierzeit führten. Teilweise verlängerte sich die Gelier-

zeit bei wasserlöslichen Extraktstoffen um bis zu 65%. Die mit Ethanol löslichen Inhaltsstoffe verkürzten hingegen die Gelierzeit.

Darüber hinaus sind besonders die wasserlöslichen Extraktstoffe für die Verklebung von Vollholz bedeutsam, da diese im Verlauf der Lagerung oder der Holz Trocknung an der Holzoberfläche und in den äußeren Bereichen des Füge teils angereichert werden (z. B. Hse und Kuo, 1988; River et al., 1991). Stellt sich ein Holzfeuchtegradient ein, wie er während der Trocknung innerhalb des Füge teils vorkommt, so werden die im Wasser gelösten Inhaltsstoffe in die Randbereiche transportiert und dort nach der Verdunstung des Wassers abgelagert. Diese Konzentration von Inhaltsstoffen kann weitreichende Folgen für die Verklebung haben (z. B. Dunky und Niemz, 2002). Es wurden daher Methoden und Verfahren entwickelt, um die Extraktstoffe von der Oberfläche zu entfernen (z. B. Zeppenfeld und Grunwald, 2005). Das in den Leimholzbetrieben übliche Hobeln kurz vor der Verklebung trägt dazu bei, die Oberflächen zu egalisieren sowie Fremdstoffe und eine Anreicherung von Extraktstoffen in der äußersten Holzschicht zu entfernen (z. B. Back, 1991).

2.3.2.2 pH-Wert

Der pH-Wert ist ein dimensionsloses Maß für die Konzentration von Wasserstoffionen in wässrigen Lösungen. Verschiedene Holzeigenschaften und damit auch die Holzverwendung werden durch den pH-Wert des Holzes beeinflusst (Sandermann und Rothkamm, 1959). Die Bestimmung des pH-Wertes von Holz kann mit verschiedenen Methoden erfolgen (z. B. Sandermann und Rothkamm, 1959; Stamm, 1961; Fengel und Wegener, 1989; Scheikl, 1994). Weit verbreitet, insbesondere für den Vergleich unterschiedlicher Holzarten, ist die Messung an wässrigen Auszügen. Die direkte Messung auf der Holzoberfläche war hingegen in der Holzanalytik lange Zeit unüblich, da die Holzfeuchte über dem Fasersättigungspunkt liegen musste (Sandermann und Rothkamm, 1959). Scheikl (1994) konnte allerdings zeigen, dass der pH-Wert auch an trockenem Holz (Holzfeuchte zwischen 10% und 12%) bestimmt werden kann, wenn vor dem Aufsetzen einer speziellen Flachglaselektrode, destilliertes Wasser auf die Oberfläche appliziert wird. Zur schnellen Bestimmung des pH-Werts im Zusammenhang mit der Verklebung von Vollholz, wird diese Methode zunehmend verwendet (Koch et al., 2003; Koch und Reinsch, 2010).

Dass der pH-Wert die Aushärtung von UF-Harzen beeinflusst, wurde unter anderem von Johns und Niazi (1980) gezeigt. An 19 nordamerikanischen Holzarten wurde der pH-Wert in kaltwässrigen Auszügen bestimmt und in Relation zur Gelierzeit eines Gemisches aus Kleb-

stoff und Holzmehl gestellt. Es zeigte sich, dass mit zunehmendem pH-Wert die Aushärtungsgeschwindigkeit abnahm. Diesen Zusammenhang zwischen pH-Wert und Gelierzeit beobachteten auch Xing et al. (2004) für verschiedene Ausgangssubstrate. Die Bestimmung der Gelierzeit wird in Kapitel 2.5.4 näher beschrieben.

Neben der Holzart ist zudem die Art der Trocknung des Holzes für die Verklebung mit pH-sensitiven Klebstoffen von Bedeutung, da es bei der technischen Trocknung des Schnittholzes zur Bildung organischer Säuren kommen kann. Bereits bei Temperaturen von über 125 °C werden in Buchenholz erhebliche Säuremengen gebildet, die die Mengen bei Fichte oder Douglasie um mehr als das Doppelte übersteigen (Sandermann et al., 1970). Allerdings entweicht aus Buchenholz vorrangig die mittelstarke Essigsäure (pKs-Wert 4,76) und nur in geringeren Mengen die sehr viel stärkere Ameisensäure (pKs-Wert 3,77) (Jung und Roffael, 2002). Unterschiede zwischen luft- und technisch getrocknetem Buchenholz stellten Frühwald et al. (1988) fest: Bei technisch getrocknetem Holz verringerte sich der pH-Wert um etwa pH 0,5 bis 1,0.

2.3.2.3 Säurepufferungsvermögen

Für eine erfolgreiche Aushärtung säurehärtender Klebstoffe ist ein Absenken des pH-Werts unabdingbar. Inwieweit dies gelingt und innerhalb welchen Zeitraums, hängt auch von der Fähigkeit des Holzes ab, die freien Protonen zu puffern, die somit nicht mehr für die Polykondensation zur Verfügung stehen. Ein Maß für den Widerstand gegenüber einer Änderung des pH-Werts ist die Pufferkapazität (z. B. Dunky und Niemz, 2002). Jedoch sind Pufferkapazität und pH-Wert einer Holzart nicht zwangsläufig miteinander korreliert (Jung und Roffael, 2002; Xing et al., 2004).

In der Holzanalytik gibt es verschiedene Methoden zur Bestimmung der Pufferkapazität (Sandermann und Rothkamm, 1959; Dunky und Niemz, 2002). Weit verbreitet ist die Messung an einer filtrierten Extraktionslösung. Hierbei wird durch schrittweise Zugabe einer Säure bzw. Base der pH-Wert dieser Lösung verändert, bis ein vorgegebener Zielwert erreicht ist. Zur chemischen Charakterisierung des Holzes wird sowohl der Verlauf dieser Absenkung, die sogenannte Titrationskurve als auch das benötigte Volumen herangezogen. Für Letzteres werden in der Literatur die Begriffe Alkalische- oder Säurepufferkapazität verwendet. Leider erfolgt die Verwendung der Begrifflichkeiten nicht stringent (z. B. Jung und Roffael, 2002; Xing et al., 2004). Das notwendige Volumen einer bestimmten Säure, das zur Senkung des pH-Werts einer definierten Lösung notwendig ist, wird in Anlehnung an Hennecke und

Roffael (2005) nachfolgend als Säurepufferkapazität bezeichnet. Auf die Bedeutung der Pufferkapazität für die Aushärtung aminoplastischer Klebstoffe weisen Dunky und Niemz (2002) hin. Regelmäßig wird in der Literatur die Pufferkapazität als ein Kriterium zur Beschreibung der Verklebbarkeit einer Holzart herangezogen (Roffael, 1987; Roffael et al., 1994; Schneider et al., 2000; Pedieu et al., 2008), obwohl bisher in nur wenigen Arbeiten ein Zusammenhang zwischen der Pufferkapazität des Holzes und dem Aushärten eines UF-Klebstoffes tatsächlich nachgewiesen wurde (Johns und Niazi, 1980; Xing et al., 2004). Als abhängige Variable diente in diesen Arbeiten die Gelierzeit des UF-Harzes, das mit dem Holzmehl der jeweiligen Holzart vermischt und in Relation zur Pufferkapazität gesetzt wurde. Die Methodik zur Bestimmung der Gelierzeit wird in Kapitel 2.5.4 vorgestellt.

2.4 Fakultative Farbverkernung bei Buche

2.4.1 Bedeutung, Ausprägung und Entstehung

Die Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen zur Verklebung von Buchenholz für tragende Holzbauteile zeigen, dass die Klebefugen oftmals nicht die notwendigen Leistungsanforderungen nach EN 301 (Verfahren I und II) einhalten, wenn das verklebte Buchenholz Farbkernanteile aufweist (Aicher und Reinhardt, 2007). Ausschließlich unverkerntes Holz zur Herstellung tragender Holzbauteile zu verwenden, ist aber wirtschaftlich nicht darstellbar, da dies eine zusätzliche Sortierung nach der Farbe erforderlich machen würde. Darüber hinaus variieren innerhalb eines Stückes Schnittholzes die Anteile von farbkernigem und unverkerntem Holz teilweise erheblich; oftmals sind nur Teilbereiche farbverkernt. Der erhöhte Aufwand für die Sortierung würde die Konkurrenzfähigkeit gegenüber anderen Produkten in Frage stellen (Frühwald et al., 2003). Für nicht farbkerniges Schnittholz konnten in der Vergangenheit immer nur dann höhere Schnittholzpreise erzielt werden, wenn die Kunden auch bereit waren, den Mehraufwand entsprechend zu honorieren. Bei tragenden Holzbauteilen steht jedoch die Funktionalität im Vordergrund und es ist daher ausgeschlossen, dass die Kosten für eine farbliche Sortierung des Buchenholzes aufgeschlagen werden können.

Farbliche Veränderungen an Buchenschnittholz werden auf verschiedene Ursachen zurückgeführt. Eine detaillierte Übersicht der im Schrifttum anzutreffenden Erklärungen findet sich bei Günsche (2000). Koch et al. (2002) unterscheiden zwischen lagerungs- und prozessbedingten

Holzverfärbungen sowie Verfärbungen, die bereits vor dem Einschlag im lebenden Baum vorhanden waren. Auf Grund ihrer Bedeutung stehen in dieser Arbeit letztere im Vordergrund. Der Farbkern der Buche ist im Gegensatz zur obligatorischen Farbkernbildung bei anderen Holzarten nicht genetisch determiniert (z. B. Bosshard, 1967).

Die Erscheinungsformen des fakultativen Farbkerns sind vielfältig und werden in der Literatur teilweise unterschiedlich bezeichnet. Sachsse (1991) unterscheidet vier Grundtypen, die sich nach Ausprägung und Genese eindeutig voneinander trennen lassen. Er differenziert zwischen Rotkern, Spritzkern, Wundkern und einen als abnormen Kerntyp definierten Farbkern. Eine ähnliche Einteilung findet sich auch bei Walter und Kučera (1991) sowie bei Höwecke (1998). Ein weiterer Farbkern, der sogenannte Risskern, wurde von Klemmt (1996) definiert.

Während Rot- und Spritzkern seit längerer Zeit in der Literatur beschrieben werden, wurde der abnorme Kerntyp erst im Zuge der Waldschadensforschung in den 1980er Jahren von den anderen Kerntypen abgegrenzt bzw. dessen Erscheinungsbild definiert. Ein zunächst vermuteter Zusammenhang zwischen immissionsbedingten Walderkrankungen und der Ausbildung eines abnormen Kernes konnte nicht bestätigt werden (Frühwald et al., 1988; Mehringer, 1989). Die Erscheinungsform dieses Kerntyps ist nahezu deckungsgleich mit dem des Spritzkerns und erschwert eine klare Unterscheidung (Sachsse, 1991). Möglicherweise wurde der abnorme Kern vielfach dem Spritzkern zugeordnet oder umgekehrt.

In Abbildung 4 sind Stammscheiben von Buchenholz mit einem Rot- bzw. Spritzkern abgebildet. Eine Unterscheidung zwischen diesen beiden Kerntypen ist nur am Stammfuß möglich. Nach dem Einschnitt kann nicht mehr zwischen rot- bzw. spritzkernigem Schnittholz differenziert werden. Der Rotkern geht vom marknahem Bereich aus und ist oft wolkenartig aufgebaut, was auf ein zeitlich versetztes Fortschreiten der Verkernung hindeutet. In Abbildung 4 ist ein Rotkern mit einem derartigen Aufbau dargestellt. Darüber hinaus treten aber auch runde und klar abgegrenzte Rotkerne auf, deren Grenzen deckungsgleich mit einem bestimmten Jahrring sind. In axialer Richtung verläuft die Ausdehnung spindelförmig im Stamm (Zycha, 1953; Krempf und Mark, 1962; Mahler und Höwecke, 1991). Im Gegensatz zum Rotkern zeichnet sich der Spritzkern durch eine groß dimensionierte, zackenförmige Begrenzung mit einer meist dunkel gefärbten Kernrandzone aus. Die farbliche Erscheinung ist im Vergleich zum Rotkern insgesamt etwas dunkler. Seine größte Ausdehnung erreicht der Spritzkern am Stammfuß und läuft kegelförmig nach oben aus.



Abbildung 4: Rot- (links) bzw. Spritzkern (rechts) bei Buche

Die Häufigkeit des Auftretens einer Farbverkernung wird in der Literatur, basierend auf Umfragen und Stichprobenerhebungen, übereinstimmend als hoch eingeschätzt (z. B. Racz et al. 1961; Walter und Kučera, 1991; Mahler und Höwecke, 1991; Klemmt, 1996; Büren von, 1998; Pöhler et al., 2004). Rot- und Spritzkern sind die zwei wichtigsten Kerntypen der Buche, wobei der Rotkern offenbar häufiger anzutreffen ist. Racz et al. (1961) fanden in einer umfangreichen Untersuchung in Niedersachsen bei rund 7% der untersuchten Bäume einen Spritzkern vor. Hingegen wiesen 59% der insgesamt 40.000 Stämme einen Rotkern auf. In einer ähnlichen Größenordnung bewegt sich der von Knoke und Schulz Wenderoth (2001) gefundene Anteil spritzkerniger Stämme. Von insgesamt 195 gefällten Buchen hatten 87% einen fakultativen Farbkern, darunter befand sich aber nur in 8% der Fälle ein Spritzkern. Der überwiegende Anteil der Bäume war rotkernig. Einen deutlich höheren Anteil spritzkerniger Buchen stellten Walter und Kučera (1991) fest: Auf bis zu 20% belief sich in dieser Untersuchung der Anteil spritzkerniger Stämme. Von Büren (2002) erfasste die unterschiedlichen Kerntypen an insgesamt 2402 Buchenstämmen und kam zu dem Ergebnis, dass 45% der Stämme keinen Farbkern hatten, während 43% einen wolkenförmigen oder runden Rotkern besaßen. Spritzkernige Farbkern sind hingegen nur an 8% der Stämme eindeutig festgestellt worden. Eine ähnliche Verteilung der Farbkern Typen fanden auch Mahler und Höwecke (1991) in einer umfangreichen Untersuchung in Baden-Württemberg vor.

Die Häufigkeit der Farbverkernung und die damit einhergehende wirtschaftliche Bedeutung für die Forst- und Holzwirtschaft erklärt das große Interesse an den Prozessen, die eine Verkernung auslösen. Mittlerweile wurde ein umfangreiches Wissen hierzu angesammelt und

eine Vielzahl von Ursachen für das Auftreten des Rotkerns untersucht und intensiv analysiert. Allgemein anerkannt ist der Erklärungsansatz nach Zycha (1948), der auf Überlegungen von Hartig und Weber (1888) aufbaut. Demnach ist die Rotkernbildung kein pathologischer, sondern ein altersphysiologischer Prozess in lebenden Buchen, der durch das Eindringen von Luft-sauerstoff ins Stamminnere ausgelöst wird. In Verbindung mit einer abnehmenden Vitalität des Parenchymgewebes, möglicherweise zusätzlich begünstigt durch weitere exogene Faktoren, werden die im Axial- und Holzstrahlparenchym vorhandenen Kohlenhydrate und die Reservestärke zu phenolischen Substanzen kondensiert und in die Zelllumina eingelagert (Dietrichs, 1964; Koch, 2004). Das Vorkommen der hochmolekularen Inhaltsstoffe bleibt auf die Lumina beschränkt (Koch 2004), was möglicherweise auf die feinporigen Zellwandfilter zurückzuführen ist, die ein Austreten der hochmolekularen Substanzen verhindern (Bosshard, 1967).

Eine umfassende chemische Charakterisierung der farbgebenden Inhaltsstoffe innerhalb eines Rotkerns und deren Verteilung im Gewebe von rotkerniger Buche findet sich bei Koch (2004). Demnach sind für die Farbgebung im Wesentlichen Catechin-Derivate und 2,6-Dimethoxybenzochinon verantwortlich. Diese hochmolekularen phenolischen Inhaltsstoffe kommen vornehmlich im Holzstrahlparenchym vor und können mit Methanol bzw. Aceton extrahiert werden.

Auch wenn es im Verlauf der Kernbildung zu einer deutlichen Färbung des Holzes kommt, geht dies nicht mit einer Erhöhung der natürlichen Dauerhaftigkeit des Kernholzes einher (z. B. Molnár et al., 2001; Koch, 2004). Neben der intensiven Färbung des Holzes kommt es außerdem zu einem Verschluss der nicht mehr wasserführenden Leitelemente durch Thyllen, die aus dem angrenzenden noch lebenden Parenchymgewebe in diese einwachsen (z. B. Zycha, 1948). Die durch den Lufteintritt verursachte Embolie der Gefäße ist von großer physiologischer Bedeutung für den Baum, wird doch die Fähigkeit zur Wasserleitung erheblich eingeschränkt, wenn nicht sogar vollständig unmöglich (Bonsen, 1991).

Der für das Auslösen der fakultativen Farbverkernung verantwortliche Lufteintritt wird regelmäßig auf Totäste (Keller, 1961; Kučera, 1991), Größe der Astnarben (Büren von, 1998) oder sonstige Verletzungen zurückgeführt (Kučera, 1991). Genannt werden in der Literatur aber auch weitere Faktoren wie z. B. Baumalter, Brusthöhendurchmesser und standörtliche Gegebenheiten. Während für die Faktoren Baumalter und Brusthöhendurchmesser wiederholt eine Abhängigkeit festgestellt wurde, ist diese für den Standort nicht eindeutig belegt. Die Angaben in der Literatur sind hier zum Teil widersprüchlich (Sachsse, 1991). Auch neuere

Untersuchungen konnten nicht zu einer Klärung beitragen (von Büren, 1998; Knoke und Schulz Wenderoth, 2001). Während von Büren (1998) davon ausgeht, dass bei ungünstigen Standortverhältnissen das Parenchymgewebe zusätzlich geschwächt und hierdurch die Farbkernbildung begünstigt wird, kommen Knoke und Schulz Wenderoth (2001) zu diametral anderen Ergebnissen. Letztere beobachteten insbesondere auf trockenen und nährstoffarmen Standorten eine tendenziell kleinere Farbkernaussprägung. Andere Faktoren erklären das Auftreten bzw. die Ausdehnung eines Farbkerns treffsicherer. Mittels eines probabilistischen Ansatzes wurde in beiden Arbeiten übereinstimmend festgestellt, dass die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Farbkerns mit zunehmendem Alter und der Größe und der Anzahl der Lufteintrittspforten (Äste, große Astnarben) steigt (von Büren, 1998; Knoke und Schulz Wenderoth, 2001). Zu einer Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit führte eine Erweiterung der Modelle mit weiteren erklärenden Variablen. Das von von Büren (2002) verwendete logistische Regressionsmodell konnte unter Einbeziehung der unabhängigen Variable Kronenarchitektur verfeinert werden, während Knoke und Schulz Wenderoth (2001) mit der Integration des durchschnittlichen Durchmesserzuwachs in die Probitanalyse eine Verbesserung des Modells erzielten.

Erklärungsansätze für die Spritzkernbildung sind in der Literatur ebenfalls zu finden. Da der Spritzkern seine größte Ausdehnung am Stammfuß erreicht und kegelförmig nach oben ausläuft, wird vermutet, dass die Entstehung nicht auf den Eintritt von Luftsauerstoff zurückzuführen ist, sondern durch andere Faktoren induziert wird (z. B. Walter und Kučera, 1991). Nicht auszuschließen ist, dass die Ursache eine sogenannte kombinierte Reaktion ist, die von Bauch et al. (1985) für Ilomba (*Pycnanthus angolensis* EXELL.) nachgewiesen wurde. Hierbei kommt es in Folge einer Besiedelung des Holzes durch Bakterien zu biochemischen oder chemischen Reaktionen, was zu einer Verfärbung des Holzes führt. Auch an spritzkernigem Buchenholz wurde, speziell im dunkelgefärbten Randbereich des Farbkerns, eine besonders intensive Besiedelung des Holzes mit Bakterien beobachtet (Aufseß von et al., 1985). Während auf unverkerntem Buchenholz keine oder nur wenige Bakterien zu finden waren, gelang es Schmidt und Mehringer (1989) aus zwei spritzkernigen Buchen insgesamt 78 Bakterienstämme zu isolieren. Eine nachfolgende Beimpfung von nicht farbverkernten Buchenholzproben mit einer Auswahl der zuvor isolierten Bakterienstämme führte zu einer Verfärbung, die eine große Ähnlichkeit mit der bei spritzkerniger Buche aufwies. Schmidt und Mehringer (1989) inkubierten Kapillarflüssigkeit, die aus hellem Buchensplintholz gewonnenen wurde, mit Bakterien. In Abhängigkeit vom gewählten Bakterienstamm war das

Bakterienwachstum mit einer Alkalisierung oder einer Ansäuerung der Kapillarflüssigkeit verbunden. Für die Änderung des pH-Werts machen Schmidt und Mehringer (1989) die bakteriellen Stoffwechselprodukte verantwortlich. Wurde ein pH-Wert von 7 überschritten, so kam es regelmäßig zu einer Braunverfärbung der Presssäfte und einem braunem Niederschlag, der auch nach einer anschließenden Zugabe von Säure erhalten blieb. Häufiger als eine Alkalisierung der Kapillarflüssigkeit wurde allerdings eine Ansäuerung festgestellt, die ohne Verfärbung einherging.

Dass es bei einer Alkalisierung von Buchenholz über einen pH-Wert von 7,3 hinaus zu einer bräunlichen Verfärbung kommt, wurde bereits von Sandermann und Lüthgens (1953) nachgewiesen. Inwieweit die von Schmidt und Mehringer (1989) *in vitro* beobachteten Zusammenhänge zwischen Bakterienwachstum und Verfärbung letztendlich ursächlich für die Bildung eines Spritzkerns im lebenden Baum sind, konnte bisher nicht abschließend geklärt werden. Es ist allerdings nicht auszuschließen, dass auch weitere Faktoren hierzu beitragen oder zumindest maßgeblich mitverantwortlich sind.

2.4.2 Anatomische Veränderungen

Bei einer auftretenden Farbverkernung werden zwei wesentliche Elemente des Buchenholzes verändert: Die Gefäße und die Holzstrahlen.

Gemeinsames Merkmal aller Farbkernotypen der Buche ist eine Verthyllung der Gefäße. Während im unverkernten Buchenholz keine Gefäßverschlüsse vorhanden sind, treten diese im farbkernigen Buchenholz regelmäßig auf; besonders gehäuft am äußeren Rand des Farbkerns, welcher sich zum Teil auch farblich deutlich vom restlichen Kern abhebt (Hösli und Bosshard, 1975; Bonsen, 1991; Klebes et al., 1988; Mehringer, 1989; Sachsse, 1991). Je weiter man sich von diesem stark verthyllten Kernrand entfernt, desto weniger Gefäßverschlüsse sind zu finden (Hösli und Bosshard, 1975). Abweichungen von dieser Thyllenverteilung über den Stammquerschnitt hinweg sind aber jederzeit möglich, da der Gefäßverschluss auch immer das Ergebnis der individuell ablaufenden Nekrobiose ist (Hösli und Bosshard, 1975).

In welchem Umfang durch die anatomischen Veränderungen die für das Verfestigen der Klebefuge so wichtige Wasseraufnahme beeinflusst wird, wurde bisher nicht untersucht. Bekannt ist allerdings, dass sich durch eine Verthyllung die axiale Permeabilität gegenüber Flüssigkeiten reduziert bzw. teilweise sogar undurchlässig wird. Das unverkernte Splintholz

ist ungleich durchlässiger und die Permeabilitätskoeffizienten unterscheiden sich um mehrere 10er Potenzen (Mehring, 1989; Büren von, 2002). Zwischen den verschiedenen Farbkern-typen der Buche konnte von Büren (2002) ebenfalls statistisch abgesichert Unterschiede nachweisen. So hatte das Holz wolkenförmig aufgebauter Rotkerne und das spritzkernige Kernholz eine geringere axiale Permeabilität als das Holz runder Rotkerne. Von Büren (2002) vermutet, dass bei wolkenförmigen Rotkernen mehrere stark verthyllte Kernrandbereiche die Wegsamkeit noch mehr einschränken, als dies ohnehin schon der Fall ist.

Neben der Verthyllung ist eine weitere auffällige Veränderung des farbkernigen Buchenholzes die Einlagerung phenolischer Substanzen in die Lumina der Axial- und Holzstrahlparenchymzellen (Koch, 2004). Für den Transport von Flüssigkeiten über die jeweilige Jahrringgrenze hinweg sind die radial verlaufenden Holzstrahlen wichtig (Kučera, 1975). Eine Ausnahme bildet offenbar nur der sogenannte abnorme Kern. Hier werden phenolische Substanzen teilweise auch in die Lumina von Faserzellen eingelagert (Sachsse, 1991).

2.4.3 Chemische Veränderungen

2.4.3.1 Extraktstoffe

Im Verlauf der Kernbildung werden Kohlenhydrate und Reservestoffe in hochmolekulare chromophore Verbindungen umgewandelt, die mit Methanol-Wasser extrahierbar sind (Koch, 2004). Der absolute Gehalt an phenolischen Inhaltsstoffen ist im rotkernigen Holz allerdings weitaus geringer als im unverkernten Bereich, jedoch maximal im Übergangsbereich vom Kern- zum Splintholz (Albert et al., 2003). Auch der Gehalt der in Heißwasser löslichen Inhaltsstoffe unterscheidet sich deutlich. Schneider et al. (2000) stellten einen um den Faktor drei geringeren Extraktstoffgehalt im rotkernigen Holz fest. Vermutlich werden diese Inhaltsstoffe zum Aufbau der hochmolekularen Stoffe benötigt, wodurch sich deren Gehalt reduziert (Mehring, 1989; Koch, 2004). Liophile Extraktstoffe, die sich mit Ethanol-Cyclohexan extrahieren lassen, sind in rotkerniger und in unverkernter Buche in gleichen Mengen vorhanden (Schneider et al., 2000). Für spritzkerniges Buchenholz wurden in der Literatur bisher keine Angaben zum Extraktstoffgehalt gemacht.

2.4.3.2 pH-Wert

Im Vergleich zu anderen heimischen Holzarten ist der pH-Wert der Buche nur schwach sauer und liegt zwischen pH 5 und 6 (z. B. Sandermann und Rothkamm, 1959; Scheikl, 1994; Albert et al., 1999). Dieser für Holz vergleichsweise hohe pH-Wert hat zur Folge, dass man bei der Herstellung von Holzwerkstoffen mit säurehärtenden Klebstoffen die Härteranteile erhöhen muss (Zeppenfeld und Grunwald, 2005) oder Gefahr läuft, dass es zu einer unzureichenden Aushärtung kommt (Kehr, 1962; Kehr und Schilling, 1965). Dieser erhöhte pH-Wert ist möglicherweise auch der Hintergrund für die pauschalen Einschätzungen von Zeppenfeld und Grunwald (2005) sowie Custodia et al. (2009), dass sich Buchenholz nur schwer verkleben lässt und es zu einem verzögertem Verfestigen der Klebefuge kommen kann.

Inwieweit sich der pH-Wert des Holzes durch eine fakultative Farbverkernung verändert, wurde in verschiedenen Arbeiten mit teilweise unterschiedlichen Methoden untersucht. Da das Untersuchungsmaterial nicht immer eindeutig beschrieben wird, ist jedoch eine durchgängige Zuordnung der Ergebnisse zu einem bestimmten Kerntyp nicht immer möglich. Die Aussagekraft ist zudem einschränkt, da der analysierte Probenumfang in allen bisherigen Arbeiten gering war.

Sandermann und Rothkamm (1959) bestimmten den pH-Wert an verkerntem Holz und Splintholz an zwei verschiedenen Buchenstämmen in unterschiedlichen Stammhöhen. In allen Fällen war der pH-Wert im Kernholz geringfügig erhöht. In der Arbeit werden allerdings der untersuchte Kerntyp und die Methodik nicht näher beschrieben. Aufgrund der unzureichenden Angaben ist nicht ausgeschlossen, dass Sandermann und Rothkamm (1959) überhaupt kein farbkerniges Material untersuchten, sondern die Bezeichnung Kernholz sich auf eine eingeschränkte Fähigkeit der Wasserleitung im Stamminneren bezieht.

Die umfangreichen pH-Messungen von Frühwald et al. (1988) an Proben von insgesamt 19 Stämmen sind wahrscheinlich nicht an farbkernigem Holz durchgeführt worden. Obwohl bei der Beschreibung des Materials wiederholt von Kernholz die Rede ist, lässt sich aus dem Kontext der Untersuchung ableiten, dass es sich hierbei nicht um farbkerniges Holz handelt, sondern um Stammanteile, die eine reduzierte Holzfeuchte aufwiesen und eine eingeschränkte Fähigkeit zur Wasserleitung hatten. Die Ergebnisse von Frühwald et al. (1988) zeigen allerdings deutlich den Effekt, den eine technische Trocknung auf den pH-Wert des Buchenholzes hat: Bei technisch getrocknetem Schnittholz lag der pH-Wert immer etwa 0,5 bis 1,0

Einheiten unter den Werten für luftgetrocknetes Holz des gleichen Stammes (vgl. Kapitel 2.3.2.2).

An Presssäften frisch eingeschlagener Buchen untersuchte Seeling (1992) den pH-Wert von rotkerniger und abnorm verkernter Buche im Vergleich zu unverkernten Referenzproben: Im farbkernigen Holz wurden immer leicht erhöhte pH-Werte gemessen, wobei die maximale Abweichung bei einer abnorm verkernten Buche 1,5 Einheiten betrug. Auf die Schwierigkeiten bei der Unterscheidung zwischen abnorm verkernter und spritzkerniger Buche wurde bereits in Kapitel 2.4.1 hingewiesen.

In wässrigen Suspensionen untersuchte von Büren (2002) den pH-Wert von rot- und spritzkernigem sowie von unverkerntem Holzmehl, aus den an den Farbkern angrenzenden Bereichen des jeweiligen Baumes. Der pH-Wert im rotkernigen Material lag zwischen 5,0 und 6,0. Nicht farbverkernte Vergleichsproben wiesen einen pH zwischen 6,0 und 6,8 auf. Die Untersuchung der spritzkernigen Proben erbrachte ein heterogenes Bild: Die pH-Werte schwankten zwischen pH 4,2 und 7,1. Im Kernrandbereich lag der pH-Wert regelmäßig um den Neutralpunkt und außerhalb des Spritzkerns zwischen pH 6,0 und 6,5. Die beiden Kerntypen konnten aufgrund der schwankenden pH-Werte nicht statistisch signifikant voneinander unterschieden werden.

Albert et al. (1999) bestimmten über den gesamten Querschnitt einer Stammscheibe hinweg pH-Werte in kaltwässrigen Auszügen. Die pH-Werte in den unverkernten Bereichen schwankten zwischen pH 5,40 und 6,23; innerhalb des rotkernigen Stammbereiches wurden pH-Werte zwischen 5,78 und 6,27 gemessen. Die festgestellten Abweichungen waren zwar gering, aber dennoch statistisch signifikant. Auffälligkeiten im Übergangsbereich des Rotkerns zu unverkernten Bereichen, wie dies von Büren (2002) bei spritzkernigen Buchen beobachtete, wurden nicht festgestellt.

In Kaltwasserextrakten technisch getrockneter Holzspäne ermittelten Schneider et al. (2000) die jeweiligen pH-Werte. In den Extrakten der rotkernigen Späne wurde ein durchschnittlicher pH-Wert von 5,9 gemessen, während sich bei den Splintholzproben ein pH-Wert von 5,7 einstellte. Ursächlich für diesen Unterschied könnten unterschiedliche Anteile von organischen Säuren in den Extraktstoffen sein. Obwohl Schneider et al. (2000) in den kaltwässrigen Extrakten der farbkernigen Späne eine größere Menge an Acetationen (pK_s -Wert 4,76) feststellten, war der pH-Wert dennoch höher, da gleichzeitig eine deutlich geringere

Menge der stärkeren Formationen (pK_s -Wert 3,77) vorkam als in den unverkernten Vergleichsproben.

In Teilarbeit II wurde auch auf die Arbeit von Mehringer (1989) verwiesen. Die Beschreibung des Untersuchungsmaterials von Mehringer (1989) ist jedoch für eine differenzierte Betrachtung unzureichend, da nicht dargestellt wird, um welchen Farbkerntyp es sich im Einzelnen handelt.

Zusammenfassend lässt sich festhalten: Die in der Literatur gefundenen Ergebnisse geben keine eindeutige Antwort auf die Frage, inwieweit eine vorhandene Farbverkernung den pH-Wert beeinflusst. Zudem wurde spritzkerniges Buchenholz nur von von Büren (2002) systematisch untersucht. Darüber hinaus wurden pH-Messungen an den für die Vollholzverklebung besonders wichtigen Holzoberflächen bisher noch nicht durchgeführt.

2.4.3.3 Säurepufferungsvermögen

Das Puffervermögen von Buchenholz wurde in der Vergangenheit vor allem im Hinblick auf die Herstellung von faser- oder spanbasierten Holzwerkstoffen untersucht, die mit alkalisch härtenden Phenol-Formaldehydharzen (PF-Harz) verklebt werden. Als Härter wird hierbei in der Regel Natriumhydroxid verwendet. In den bisherigen Untersuchungen zur Pufferkapazität von Buchenholz wurde die Titration mit dieser Lauge durchgeführt. Es zeigte sich, dass die Buche im Vergleich zu Kiefer oder Eiche eine niedrigere alkalische Pufferkapazität besitzt und sich auf einem ähnlichen Niveau wie bei der Fichte befindet (Jung und Roffael, 2002). Intraspezifische Unterschiede zwischen rotkernigem und unverkerntem Buchenholz haben Albert et al. (1999) und Schneider et al. (2000) in wässrigen Extraktstoffen untersucht. Übereinstimmend wurde festgestellt, dass zur pH-Wert-Erhöhung des rotkernigen Holzes eine deutlich geringere Menge an Lauge notwendig ist.

Die einzige Arbeit, die bisher das Säurepufferungsvermögen von Buchenholz betrachtet hat, stammt von Sandermann und Rothkamm (1959). Jedoch wurde die Pufferkapazität nicht in wässrigen Auszügen gemessen, sondern mittels einer bestimmten Menge Holzmehl, die mit einer definierten Menge Salzsäure vermischt wurde. Der sich in diesem Ansatz einstellende pH-Wert wurde nach zwei Stunden gemessen. Die Angabe der Säurepufferkapazität erfolgte als Verhältnis der Menge an Salzsäure je Liter und der durch sie hervorgerufenen Änderung des pH-Werts. Im Vergleich zum Holz der Fichte, Kiefer und Lärche erhöhte sich der pH-Wert bei nicht farbkerniger Buche fast um den Faktor zwei. Eschenholz nahm eine Zwischenstellung ein und erreichte nicht das Niveau der Buche. Buchenholz besitzt somit die Fähig-

keit, eine vorhandene Säure deutlich stärker zu puffern als die oben genannten Holzarten. Sandermann und Rothkamm (1959) haben zwar die Pufferkapazitäten für eine Vielzahl von Holzarten bestimmt, allerdings ohne die Ergebnisse durch wiederholte Messungen abzusichern.

2.5 Methoden zur Charakterisierung der Klebstoffverfestigung

2.5.1 Einbeziehung des Faktors Holz

Zur Verfolgung des Verfestigens des Klebstoffes steht eine ganze Reihe von Methoden zur Verfügung. Einen Überblick über die etablierten Untersuchungsverfahren geben beispielsweise Habenicht (2009) sowie Dunky und Niemz (2002). Viele der vorgestellten Methoden erlauben allerdings nicht, die Versuchsbedingungen derart zu gestalten, dass praxisnahe Verhältnisse simuliert werden können (Dunky und Niemz, 2002). So wird bei vielen Verfahren der Einfluss des Fügepartikels nicht in die Betrachtung einbezogen. Zudem kann teilweise nur ein bestimmter Zeitpunkt bzw. zeitlicher Abschnitt während des gesamten Verklebungsprozesses untersucht werden.

Soll der Einfluss des Holzes und seiner wechselnden inter- und intraspezifischen Eigenschaften auf das Verfestigen der Leime untersucht werden, so sind hierfür speziell angepasste Methoden erforderlich. Kein Verfahren ist bisher in der Lage, den gesamten Prozess abzubilden; es können immer nur Teilaspekte betrachtet werden. Im Folgenden werden die gängigsten Verfahren kurz vorgestellt.

2.5.2 Daumentest

Ein sehr einfaches und in der Praxis vielfach verwendetes Verfahren ist der sogenannte Daumentest. Hierbei wird eine bestimmte Menge Klebstoff unter definierten Rahmenbedingungen auf eine Lamelle gegeben. Nach vorgegebenen Zeitspannen wird der Daumen auf die Klebstofffläche angedrückt und wieder senkrecht zur Lamellenebene abgezogen. Bildet der Klebstoff hierbei Fäden, die sehr schnell abreißen, so geht man davon aus, dass das Ende der offenen Wartezeit bereits erreicht bzw. überschritten wurde. Mit dieser Methode kann

somit ausschließlich die offene Wartezeit bestimmt werden. Es ist offensichtlich, dass dieses Verfahren sehr stark von der Erfahrung des Prüfers und dessen subjektiver Einschätzung abhängt.

Über viele Jahrzehnte hinweg wurde diese Prüfmethode in Deutschland zur Bestimmung der Gebrauchseigenschaften von Klebstoffen herangezogen. Mittlerweile wurde dieses Prüfverfahren durch eine abgewandelte Delaminierungsprüfung ersetzt. Jedoch sind die Ergebnisse der Delaminierungsprüfung von vielen Faktoren abhängig, die nicht immer mit dem Verfestigen der Klebstoffuge in Verbindung stehen (vgl. Kapitel 2.2.1.1.2).

2.5.3 Dynamisch-mechanische Analyse

Einen interessanten Ansatz zur Beschreibung des Verfestigens von Klebstoffen auf Holzoberflächen stellte Witt (2004) vor. Zur Bestimmung des Gelpunktes oder der maximal offenen Wartezeit von PRF-Harzen verwendete Witt (2004) eine dynamisch-mechanische Analyse (DMA). Hierfür wurde ein Rheometer mit Platte/Platte-Messsystem verwendet, wobei die untere Platte durch ein Buchenfurnier ersetzt wurde. Um einen ungestörten Vernetzungsprozess zu ermöglichen, wurden die Oszillationsversuche im linear-viskoelastischen (LVE-) Bereich durchgeführt. Durch eine konstant vorgegebene Deformation des sich zwischen den beiden Platten befindlichen Klebstoffes konnten die beiden rheologischen Messgrößen Schubspannung und Phasenverschiebungswinkel ermittelt werden. Das Verfestigen des Klebstoffes kann aus diesen beiden Größen kontinuierlich berechnet und der Gelpunkt, also der Übergang vom Sol- zum Gelzustand, bestimmt werden. Dieser ist erreicht, wenn Verlust- und Speichermodul gleich sind und sich damit das Verhältnis zwischen dem viskosen und dem elastischen Anteil die Waage hält (Halasz et al., 2000; Garnier et al., 2002).

Eine wesentliche Voraussetzung für die rheologische Messung mit dem sogenannten Platte/Platte-Verfahren ist, dass der Plattenabstand während der Messung konstant bleibt (z. B. Mezger, 2010). Obwohl das Holz im Verlauf der Messung durch das im Leim enthaltene Wasser quillt, der Klebstoff in das Holz eindringt und sich der Spaltabstand damit verändert, konnte Witt (2004) dennoch verlässliche Messwerte gewinnen und die Schubmoduln berechnen.

2.5.4 Gelierzeitmessung

Eine weitere Methode, die auch dazu geeignet ist, den Einfluss der Holzart auf das Verhalten des Klebstoffes während des Verfestigens zu bestimmen, ist die sogenannte Gelierzeitmessung. Unter der Gelierzeit versteht man in diesem Zusammenhang die Zeitspanne, in der eine Kolloidlösung vom Sol- in den Gelzustand übergeht. Einfache, automatisierte und praxisnahe Verfahren zur Messung der Gelierzeit wurden unter anderem von Clad (1961) vorgestellt. Die Bestimmung erfolgt mittels standardisierter Messeinrichtungen, die im Wesentlichen nach folgendem Prinzip ablaufen: Ein spezieller Messstempel wird durch einen Elektromotor angetrieben und vollführt eine vertikale Hubbewegung innerhalb eines definierten Klebstoffgemisches, das in der Regel chemisch aushärtet. Das Gemisch befindet sich in einem Reagenzglas, das wiederum in ein Wasserbad eingehängt ist, dessen Temperatur regelbar ist. Das Reagenzglas ist an einer speziellen Aufhängevorrichtung eingehängt. Das Aushärten des Klebstoffes führt dazu, dass die Viskosität ansteigt und der Messstempel einen zunehmenden Widerstand erfährt. Ist der Widerstand groß genug, wird die Masse des Reagenzglases inklusive des Harzes vom Messstempel getragen und die Aufhängung entlastet. Der Zeitraum zwischen dem Beginn der Aushärtung und dem Entlasten der Aufhängung wird als Gelierzeit bezeichnet.

Um den Einfluss des Holzes auf die ablaufende Aushärtung quantifizieren zu können, wurden verschiedene Holzmehle (Johns und Niazi, 1980; Xing et al., 2004), aber auch Extraktstoffe (Albritton und Short, 1979) dem Klebstoff beigemischt und die Gelierzeit mittels der beschriebenen Methode bestimmt. Die Resultate zeigen übereinstimmend, dass ein Einfluss des Holzes auf die Gelierzeit gegeben ist.

Bisher wurde dieses Verfahren für Fragestellungen im Zusammenhang mit der Herstellung von span- oder fasergebundenen Holzwerkstoffen herangezogen (Johns und Niazi, 1980; Xing et al., 2004). Da hier der Presskuchen mit hoher Temperatur beaufschlagt wird, wurden die bisherigen Untersuchungen auch bei hohen Temperaturen durchgeführt. Inwieweit sich die Ergebnisse dieser Methode auch zur Beantwortung von Fragen bei der Verklebung von Vollholz übertragen lassen, wurde bisher nicht geklärt.

Im Rahmen einer Bachelorarbeit an der Holzforschung München (Jánosi, 2010) wurde die beschriebene Methode getestet. Zudem wurde die Verteilung der Partikelgrößen, die sich nach dem Mahlen des Holzes ergibt, untersucht. Es zeigte sich, dass diese erheblich von der jeweiligen Holzart abhängt und sich unterschiedliche Lagerungsdichten des Holzmehls

ergeben. Eine massenbezogene Beimengung, wie es Johns und Niazi (1980) sowie Xing et al. (2004) vorschlagen, führt somit bereits vor Beginn der Messung zu unterschiedlichen Viskositäten zwischen den verschiedenen Leim-Holz-Gemischen. Um dies zu verhindern, wäre zumindest eine enge Fraktionierung des Holzmehls notwendig, um ähnliche Ausgangsbedingungen gewährleisten zu können. Geeignet erscheint dieses Verfahren daher nur für eine Quantifizierung der intraspezifischen Einflüsse, da es hier zu keiner oder einer vernachlässigbaren Verschiebung der Ausgangsviskosität kommt.

2.5.5 Zugscherfestigkeit

Mit einer zunehmenden Verfestigung des Klebstoffes steigen auch die kohäsive und die adhäsive Festigkeit innerhalb der Leimfuge an. Bock (1952) stellt ein Verfahren vor, das die Entwicklung der Klebefugenfestigkeit in Abhängigkeit von Presszeit und Temperatur ermöglicht. Hierzu werden zweiseitige Holzplättchen mit einer bestimmten Geometrie gefügt und verpresst. Anschließend wird mittels Zugscherprüfung die sich ausbildende Klebefugenfestigkeit bestimmt. Mit zunehmender Presszeit steigt die Festigkeit an, bis die Endfestigkeit erreicht ist. Herangezogen wird die Zugscherprüfung beispielsweise zur Bestimmung der erforderlichen Mindestpresszeit im Rahmen der Zulassungsprüfung von Klebstoffen.

In Vorstudien wurde versucht abzuschätzen, inwieweit die Zugscherprüfung geeignet ist, den Einfluss der Holzart auf die Festigkeitsentwicklung zu beschreiben. Im Rahmen von zwei Bachelorarbeiten wurde ein entsprechendes Verfahren erprobt (Gossler, 2009; Hüchelheim, 2010). Es zeigte sich, dass bereits eine gewisse Klebefugenfestigkeit vorhanden sein muss, da ansonsten die Prüfkörper bei der Entnahme aus der Presse verrutschen oder auseinanderfallen. Belastbare und reproduzierbare Ergebnisse lassen sich daher nur erzielen, wenn das Verfestigen bereits weit fortgeschritten ist.

Eine Apparatur, die es auch erlaubt, bereits geringe Bindefestigkeit zu ermitteln, wurde von Bolton und Humphrey (1977) entwickelt. Dieses sogenannte Automatic Bonding Evaluation System (A.B.E.S.) gestattet die Scherprüfung direkt im Anschluss an den Pressvorgang vorzunehmen, ohne die Prüfkörper zu bewegen. Das Pressen kann zudem unter isothermen Bedingungen erfolgen. Nach einer mündlichen Mitteilung von Humphrey (2008) ist die Methode prinzipiell dazu geeignet, auch den Einfluss variierender Holzeigenschaften oder unter-

schiedlicher Holzarten auf die Entwicklung der Bindefestigkeit in Abhängigkeit von der Zeit zu untersuchen. Entsprechende Publikationen liegen hierzu bisher allerdings noch nicht vor.

3 Zielsetzungen

3.1 Delaminierung und Scherfestigkeit (Teilarbeit I)

Eine wesentliche Zielsetzung der vorliegenden Teilarbeit I war es festzustellen, inwieweit sich Buchenholzlamellen in praxisüblichen Abmessungen mit zwei handelsüblichen MUF-Klebstoffen hinreichend beständig verkleben lassen. Neben den beiden Klebstoffsystemen wurde auch untersucht, welche Einflüsse verschiedene geschlossene Wartezeiten sowie rot- und spritzkerniges Buchenholz

- auf die Delaminierungsbeständigkeit
- und die Ergebnisse der Scherfestigkeitsprüfung haben.

Zusätzlich sollten auch etwaige Zusammenhänge zwischen den Ergebnissen der Delaminierungs- und der Scherfestigkeitsprüfung aufgezeigt und Empfehlungen für die Qualitätssicherung bei der Herstellung von gefügten Verbindungen abgeleitet werden.

Um auch Rückschlüsse auf die Ursachen unterschiedlicher Klebefugenqualitäten ziehen zu können, wurden ausgewählte Fugen unter dem Lichtmikroskop betrachtet.

Aus den Ergebnissen der Teilarbeit I ergaben sich neue Fragestellungen, die in den Teilarbeiten II und III beantwortet wurden.

3.2 Charakterisierung verklebungsrelevanter Holzeigenschaften von Buche (Teilarbeit II)

Das Verfestigen von MUF-Klebstoffen wird von mehreren holzartenspezifischen Faktoren beeinflusst, die bisher für Buchenholz, insbesondere aber für rot- und spritzkerniges Buchenholz, nur eingeschränkt oder lückenhaft beschrieben sind. Die vorliegende Teilarbeit II beschäftigt sich mit folgender Fragestellung: Werden durch intraspezifische Unterschiede

- der Wasseraufnahmekoeffizient,
- der pH-Wert an der Holzoberfläche,
- der pH-Wert in wässrigen Auszügen,
- die Menge der wasserlöslichen Extraktstoffe,
- und das Säurepufferungsvermögen beeinflusst?

Die Ergebnisse für Buchenholz wurden zudem mit denen von Fichte-, Lärche- und Eschenholz verglichen, um eine Einordnung und Bewertung vornehmen zu können. Da die betrachteten Klebstoffsysteme primär auf die Verklebung von Fichtenholz ausgerichtet sind, steht der Vergleich mit dieser Holzart im Vordergrund.

3.3 Entwicklung einer Methode zur Charakterisierung des Verfestigens einer Leimfuge (Teilarbeit III)

Bereits nach dem Auftragen des Klebstoffes und dem Fügen der Lamellen beginnt das Verfestigen der Leimfuge. In Teilarbeit I konnte gezeigt werden, dass die Zeitspanne zwischen dem Fügen der Lamellen und dem Einsetzen des Pressdrucks von großer Bedeutung für die Klebefugenbeständigkeit ist. Ziel der Teilarbeit III war es, eine Methode zu entwickeln, die es erlaubt, diesen Teilbereich des Klebevorgangs zu beobachten und intra- und interspezifische Einflüsse des Holzes auf das Verfestigen der Fuge zu quantifizieren. Im Fokus der Untersuchung stand die Frage, inwieweit der Buchenfarbkern während dieser speziellen Phase des Verklebungsvorganges einen Einfluss auf das Verfestigen der Leimfuge hat. Um eine Einordnung der Resultate vornehmen zu können, wurden vergleichende Untersuchungen mit anderen heimischen Nadel- und Laubholzarten durchgeführt. Zusätzlich sollte die Methode die Möglichkeit bieten, unterschiedliches Eindringverhalten von Klebstoffgemischen in die Fügeteile zu beschreiben. Der Begriff Klebstoffgemisch beinhaltet auch das Wasser, das als Lösungsmittel in erheblichem Umfang in dem Gemisch enthalten ist.

4 Material

Aufgrund des limitierten Umfangs der drei Publikationen konnte das verwendete Material teilweise nicht in der notwendigen Tiefe beschrieben werden. Insbesondere die Angaben zum Material, das in den Teilarbeiten II und III verwendet wurde, werden an dieser Stelle ergänzt. Auf die Darstellung der verwendeten Methoden wird hingegen verzichtet, da diese in den Veröffentlichungen ausreichend dargelegt wurden.

Das in den Teilarbeiten II und III untersuchte Holz entstammte der Schnittholzcharge, die für die Untersuchungen der Teilarbeit I beschafft wurde. Die Farbkerntypen der beiden Laubhölzer wurde bereits nach der Fällung ausschließlich anhand optischer Merkmale an den beiden Stammquerschnitten bestimmt. Hatte der Farbkern der Buchenstämme eine zackenförmige Begrenzung und eine dunkel gefärbte Kernrandzone, so wurde dieses Material dem Typus Spritzkern zugeordnet; kreisrunde oder wolkige Begrenzungen dem Typus Rotkern. Eine bakterielle Untersuchung der Spritzkerne wurde nicht vorgenommen.

Von den insgesamt dreizehn Stammabschnitten der Buche, die jeweils von verschiedenen Bäumen stammten, wurden Schnitthölzer von sieben Abschnitten für die Untersuchungen im Rahmen der Teilarbeit II zufällig ausgewählt. Alle sieben Stammabschnitte waren keine Erdstammstücke. Die Abschnitte stammten aus einer Baumhöhe von etwa acht Metern. Damit war sichergestellt, dass der Standort bzw. Boden den pH-Wert des Holzes nicht beeinflusst (z. B. Sandermann und Rothkamm, 1959). Drei Abschnitte wurden anhand der oben beschriebenen Kriterien eindeutig dem Typus Spritzkern und vier eindeutig dem Typus Rotkern zugeordnet. In ihren Erscheinungsbildern am Stammfuß unterschieden sich die beiden Gruppen deutlich. In Abbildung 4 (vgl. Kapitel 2.4.1) sind zwei Stammscheiben, die von einem rot- bzw. spritzkernigen Abschnitt stammen, exemplarisch abgebildet.

Bei der Gewinnung des Materials für die chemischen Untersuchungen wurde darauf geachtet, dass dieses nicht aus den oftmals deutlich dunkler gefärbten Randbereichen der Farbkerne kam. Hingegen enthielten die größeren Prüfkörper, die für die Bestimmung des Wasseraufnahmevermögens verwendet wurden, oftmals diesen Kernrandbereich.

Das nicht farbkernige Material für die Untersuchungen der Teilarbeiten II und III entstammte ebenfalls den sieben zufällig ausgewählten Abschnitten und wurde aus den farbkernfreien Randbereichen der Stämme entnommen. Analog zu dieser Vorgehensweise wurde auch das Eschenholz gewonnen. Eine differenzierte Unterscheidung in verschiedene Kerntypen ist bei

Esche nicht erforderlich, da hier nur der sogenannte Braunkern auftritt. Die fünf Abschnitte entstammten nicht wie die Buche dem Wuchsgebiet Fränkischer Keuper und Haßberge, sondern wurden etwa zehn Kilometer südwestlich von Miesbach in Oberbayern im Winter gefällt, in einem naheliegenden Sägewerk eingeschnitten und an der Holzforschung München technisch getrocknet.

Die in den Teilarbeiten I und III verwendeten MUF-Systeme sind identisch. Auch die Mischungsverhältnisse von Leim und Härter wurden beibehalten. Bei den Bezeichnungen der beiden MUF-Klebstoffe kam es jedoch zu einer Verwechslung: Der in Teilarbeit I als MUF-1 bezeichnete Klebstoff wurde in Teilarbeit III versehentlich als MUF-2 ausgewiesen und umgekehrt. Im weiteren Verlauf wird daher eine neue Bezeichnung eingeführt (vgl. Tabelle 4).

Tabelle 4: Bisherige und neue Bezeichnung der verwendeten MUF-Klebstoffsysteme

Teilarbeit I	MUF-1	MUF-2
Teilarbeit III	MUF-2	MUF-1
neue Bezeichnung	MUF-langsam	MUF-schnell

Beide MUF-Systeme erfüllen die Kriterien der EN 301 und sind für die Verklebung tragender Bauteile aus Fichtenholz zugelassen. Auch ohne Einhaltung einer bestimmten Mindestwartezeit lässt sich mit beiden Systemen Fichtenholz mit einer hohen Qualität verkleben, sodass eine ausreichend hohe Delaminierungsbeständigkeit gegeben ist (Schmidt und Knorz, 2010). Unterschiede zwischen den beiden Klebstoffen sind bei der Topfzeit und dem Zeitraum bis zum Erreichen des Gelpunktes gegeben. Die neu gewählten Bezeichnungen spiegeln die Reaktivität der Systeme wider.

5 Ergebnisse der Teilarbeiten

5.1 Delaminierung und Scherfestigkeit (Teilarbeit I)

Die Ergebnisse der Teilarbeit I wurden im Jahr 2010 in einem Publikationsorgan mit peer review Verfahren veröffentlicht (Schmidt et al., 2010a). Erstmals dokumentiert wurden die in Teilarbeit I erzielten Ergebnisse in einem Prüfbericht im Februar 2008, der dem Sachverständigen Ausschuss des Deutschen Instituts für Bautechnik e.V. in Berlin vorgelegt wurde (Glos und Schmidt, 2008). Zudem wurden die Resultate im März 2008 bei einem Doktorandenkolloquium in Stuttgart einem breitem Fachpublikum vorgestellt und in dem dazugehörigen Tagungsband beschrieben (Schmidt, 2008). Im Folgenden werden die wichtigsten Resultate für die beiden MUF-Klebstoffe zusammengefasst, um einen schnellen und einfacheren Überblick zu ermöglichen. Zusätzlich werden ergänzende Informationen zu den Versagensursachen gegeben, die nicht Bestandteil der Veröffentlichung (Schmidt et al., 2010a) waren.

5.1.1 Delaminierung

- Nicht farbverkerntes Buchenholz konnte mit beiden untersuchten MUF-Systemen dauerhaft verklebt werden. Um eine hohe Fugenbeständigkeit zu erzielen, die auch extremen Prüfbedingungen gewachsen ist (Prüfverfahren I nach EN 302-2), muss allerdings eine geschlossene Wartezeit von mehr als 30 Minuten eingehalten werden. Bei einer geschlossenen Wartezeit von 30 Minuten oder kürzer konnten positive Resultate nur dann erreicht werden, wenn das weniger strenge Prüfverfahren II nach EN 302-2 verwendet wurde.
- Unterschiede zwischen rotkernigem und unverkerntem Buchenholz wurden nur bei einer geschlossenen Wartezeit von 30 Minuten festgestellt. Bei dieser Wartezeit waren die beobachteten Fugenöffnungen zwischen den verklebten rotkernigen Lamellen maximal. Bei Klebeverbindungen, die mit Wartezeiten von 60 und 90 Minuten hergestellt wurden, war immer eine ausreichend hohe Beständigkeit gegeben; Klebefugen

zwischen rotkernigen und nicht farbkernigen Lamellen zeigten gleichermaßen gute Ergebnisse.

- Prüfkörper, die aus spritzkernigem Buchenholz aufgebaut waren, wurden nur für eine geschlossene Wartezeit von 60 bzw. 90 Minuten hergestellt, da eine vollumfängliche Verkernung der Lamellen bei diesem Farbkerntyp nur vereinzelt auftritt und daher nicht genügend Lamellen zum Aufbau einer größeren Zahl kleinformatiger Träger zur Verfügung standen (vgl. Kapitel 6.1). Die Fugenbeständigkeit war bei diesen langen Wartezeiten stets gegeben; Unterschiede zwischen den beiden Farbkerntypen wurden nicht festgestellt.
- In der Veröffentlichung wurde nicht detailliert dargestellt, welche Versagensursachen beim Öffnen der Klebefugen nach der Rücktrocknung vorgefunden wurden. Häufig kam es zu Delaminierungen in der Grenzschicht zwischen Klebstoff und der angeklebten Holzlamelle. Hierbei wurden keine oder nur eine geringe Holzfaseranhaftungen an der Klebstoffschicht gefunden. Dieses Versagen weist auf eine nur unzureichend ausgebildete Adhäsion hin. Unbedeutend waren hingegen Kohäsionsrisse oder Holzbrüche innerhalb der ersten Zellreihen des Fügeteils.

5.1.2 Scherfestigkeitsprüfung

- Während die geschlossene Wartezeit einen deutlichen Einfluss auf die Delaminierungsbeständigkeit hatte, waren derartige Abhängigkeiten bei Scherfestigkeit und Holzbruchanteil nicht feststellbar. Für alle Verklebungsparameter und untersuchten Farbkerntypen waren entweder eine hohe Festigkeit oder zumindest ein hoher Faserbruchanteil gegeben. Zumeist waren die Werte für beide abhängigen Variablen sehr hoch. Nur bei einer geschlossenen Wartezeit von 30 Minuten waren die Holzbruchanteile im Vergleich zu längeren Wartezeiten geringfügig reduziert.
- Zwischen erreichter Scherfestigkeit und Delaminierung der jeweiligen Klebefuge besteht kein Zusammenhang. Hingegen ist zwischen dem Holzbruchanteil und der Klebefugenbeständigkeit ein gewisser Zusammenhang gegeben. Insbesondere wenn die Bruchanteile unter 50% lagen, wurden gleichzeitig große Fugenöffnungen festgestellt.

- Die lichtmikroskopische Untersuchung ausgewählter Klebstofffugen zeigte, dass bei geschlossenen Wartezeiten von 15 bzw. 30 Minuten nur eine extrem dünne oder keine Fuge ausgebildet wird und der Klebstoff tief in das Holzgewebe eindringt. Bei längeren geschlossenen Wartezeiten war hingegen eine normale Fugenausbildung zu beobachten, gleichzeitig nahm die Fugenbeständigkeit zu.

5.2 Charakterisierung verklebungsrelevanter Holzeigenschaften von Buche (Teilarbeit II)

Die Resultate der Teilarbeit II wurden im Jahr 2012 veröffentlicht (Schmidt et al., 2012). Die wichtigsten Ergebnisse werden nachfolgend ebenfalls dargestellt. Da sich bei allen untersuchten Kenngrößen keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Farbkerntypen ergaben, wurde in der Publikation nicht zwischen rot- und spritzkernigem Buchenholz differenziert, sondern die Ergebnisse wurden zusammengefasst. In Tabelle 5 sind die Resultate nun detailliert dargestellt. Zur leichteren Vergleichbarkeit wurden die Werte für unverkernte Buche und Fichte in die Tabelle integriert.

Darüber hinaus sind in den nachfolgenden Ausführungen Abbildungen von Untersuchungen mit Berberinlösung enthalten, die in der Publikation nur angedeutet, aber nicht aufgenommen wurden. Diese Aufnahmen unterstreichen und illustrieren die Ergebnisse.

Tabelle 5: Ergebnisse für unverkerntes, rot- und spritzkerniges Buchenholz sowie für Fichtenholz (Mittelwerte und Anzahl der Messwerte)

		Buche un- verkernt	Buche rot- kernig	Buche spritz- kernig	Esche un- verkernt	Esche braun- kernig	Fichte
Wasseraufnahme- koeffizient in $\text{kg/m}^2 \text{h}^{-0,5}$		0,201 (n = 64)	0,118 (n = 16)	0,124 (n = 20)	0,142 (n = 39)	0,102 (n = 24)	0,084 (n = 10)
pH- Wert	frische Oberfläche	5,08 (n = 15)	5,16 (n = 10)	5,10 (n = 10)	5,48 (n = 5)	5,22 (n = 6)	4,80 (n = 5)
	gealterte Oberfläche	5,32 (n = 15)	5,50 (n = 10)	5,46 (n = 10)	5,70 (n = 5)	5,64 (n = 6)	5,03 (n = 5)
	Filtrat	5,45 (n = 15)	5,76 (n = 10)	5,68 (n = 10)	5,56 (n = 5)	5,29 (n = 6)	5,13 (n = 5)
Extraktstoffgehalt in %		1,85 (n = 13)	0,76 (n = 7)	0,75 (n = 6)	3,92 (n = 5)	2,63 (n = 6)	0,71 (n = 5)
Pufferkapazität in mmol HCl/100g		5,46 (n = 10)	2,10 (n = 10)	2,07 (n = 10)	5,75 (n = 5)	4,71 (n = 6)	2,71 (n = 10)

5.2.1 Wasseraufnahmevermögen

- Die Wasseraufnahmekoeffizienten zwischen den untersuchten Holzarten variierten erheblich. Maximal war die Wasseraufnahme bei unverkernter Buche. Die Koeffizienten für Esche und Fichte blieben hingegen um etwa 30% bzw. 60% unter dem Wert für unverkerntes Buchenholz.
- Rotkerniges Buchenholz hatte einen mittleren Wasseraufnahmekoeffizienten von $0,118 \text{ kg/m}^2 \text{h}^{-0,5}$. Für spritzkerniges Buchenholz wurde ein Koeffizient von $0,124 \text{ kg/m}^2 \text{h}^{-0,5}$ ermittelt. Mit Hilfe des Welch-Tests⁷ wurde überprüft, ob die Abweichung zwischen den Mittelwerten systematisch oder zufällig ist. Es zeigte sich, dass die beiden Stichproben mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% der gleichen Grundgesamt-

⁷Der Welch-Test kam zur Anwendung, da die Varianzen der beiden Stichproben heterogen waren.

heit angehören. Die Wasseraufnahme von rot- und spritzkerniger Buche unterscheidet sich somit nicht.

- Eine fakultative Farbverkernung hatte sowohl bei Buche als auch bei Esche einen signifikanten Einfluss auf die Wasseraufnahme. Der Wasseraufnahmekoeffizient reduzierte sich bei Buche um etwa 40% und bei Esche um ca. 30% gegenüber der unverkernten Referenz.
- Verantwortlich für die Unterschiede sind möglicherweise anatomische Veränderungen, die sich im Verlauf der Verkernung einstellen. Obwohl diese Hypothese nicht vertiefend untersucht wurde und somit nicht abschließend bejaht werden kann, unterstützen die Abbildung 5 bis 8 diese Vermutung⁸. Die ausgewählten Aufnahmen zeigen exemplarisch häufig vorgefundene Muster. Im oberflächennahen Bereich des nicht farbkernigen Buchenholzes wurde die gesamte Holzstruktur intensiv zum Leuchten angeregt. Inwieweit die verschiedenen Strukturelemente des Holzes an der Aufnahme der Lösung beteiligt waren und welche Rolle diese hierbei spielten, lässt sich anhand der Aufnahmen nicht erkennen. Es zeigte sich allerdings, dass mittels der radial verlaufenden Holzstrahlen die Berberinlösung auch in tiefere Bereiche des Holzgewebes gelangte. Auffällig ist zudem, dass regelmäßig der Transport an der Jahrringgrenze zum Erliegen kam. Nur in wenigen Ausnahmefällen wurde beobachtet, dass die Grenze zum nächstliegenden Jahrring überschritten wurde. Im Bereich des farbkernigen Holzes war die Aufnahme der Lösung nicht gänzlich unterbrochen, aber deutlich eingeschränkt. Insbesondere im Kernrandbereich wurde nahezu kein Berberin zum Leuchten angeregt. Man kann daher annehmen, dass hier keine Lösung in das Holz eingedrungen ist.

⁸An mehr als 80 kleinformatischen Probekörpern wurde versucht, die Wasseraufnahme mit Hilfe einer 2,5%igen Berberinlösung sichtbar zu machen. Es wurde sichergestellt, dass die Lösung ausschließlich über die tangentielle Oberfläche der Probekörper in das Holzgewebe eindringt. Die Probekörper wurden etwa 5 Millimeter tief und über einen Zeitraum von 24 Stunden in einer Petrischale mit der wässrigen Berberinlösung gelagert. Die Oberflächen waren frei zugänglich und so gewählt, dass in der Lösung nicht oder vollständig farbkerniges Holz eingelegt wurde. Teilweise wurde auch gezielt der Rand des Farbkerns ausgewählt. In diesem Fall befand sich farbkerniges und nicht farbkerniges Holz innerhalb eines Probekörpers. Mit Hilfe eines Fluoreszenzmikroskops wurde das Berberin, nach einer mehrstündigen Lagerung in der Lösung und einer kurzen Phase der Abtrocknung, zum Leuchten angeregt. Geht man davon aus, dass Berberin gemeinsam mit dem Wasser in das Holz eindringt, liefern die mikroskopischen Aufnahmen einen Einblick in die bevorzugten anatomischen Transportwege des Wassers. Allerdings lässt sich mit dieser Methode nicht visualisieren, inwieweit ein Transport in axialer Richtung erfolgt. Zudem ist zu beachten, dass das Berberinmolekül größer ist als jenes von Wasser. Berberin wird deshalb nur bedingt in die gleichen anatomischen Strukturen vordringen können.

In den großen Gefäßen des Frühholzes der Esche wurde kein Berberin eingelagert. Mittels der Holzstrahlen erfolgte hier auch ein Transport über Jahrringgrenzen hinweg in oberflächenferne Bereiche. War allerdings eine Farbverkernung vorhanden, gelangte über diesen Transportweg nahezu keine Lösung mehr in das tiefergelegene Holzgewebe. Stark reduziert war die Aufnahme, wenn an der Oberfläche das dichtere Spätholz vorhanden war und das Holz gleichzeitig braunkernig war.

- Obwohl weitergehende Analysen mittels Berberinlösung zeigten, dass im Kernrandbereich eine besonders eingeschränkte Aufnahme der Lösung zu verzeichnen war, gab es keine erkennbaren Abweichungen zwischen Prüfkörpern, die den Kernrandbereich enthielten und solchen, die ausschließlich innere Bereiche des Farbkerns abdeckten.

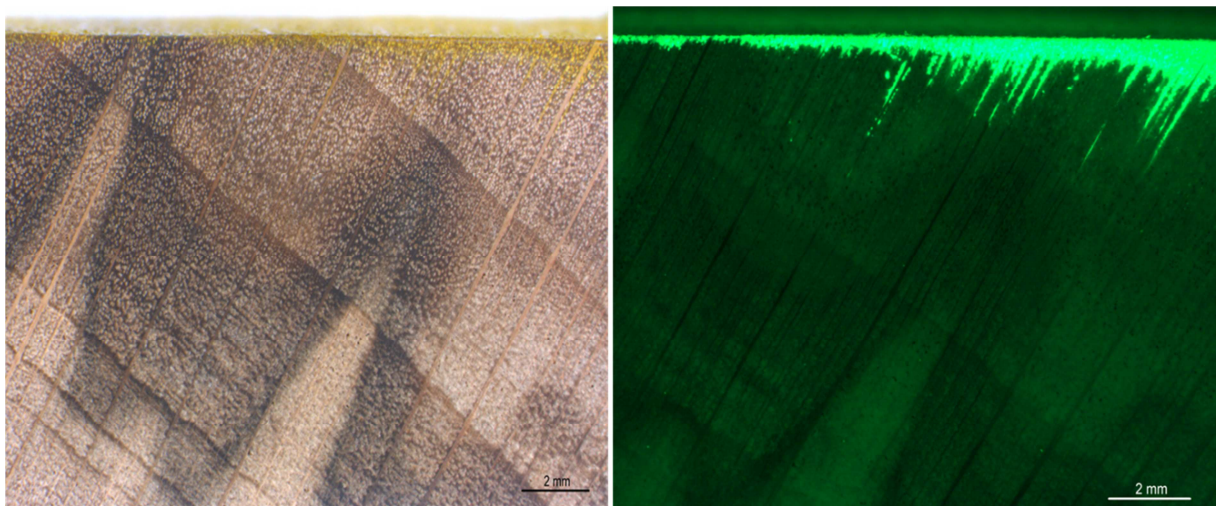


Abbildung 5: Eindringen der Berberinlösung im Bereich des Spritzkernrandes bei Buche

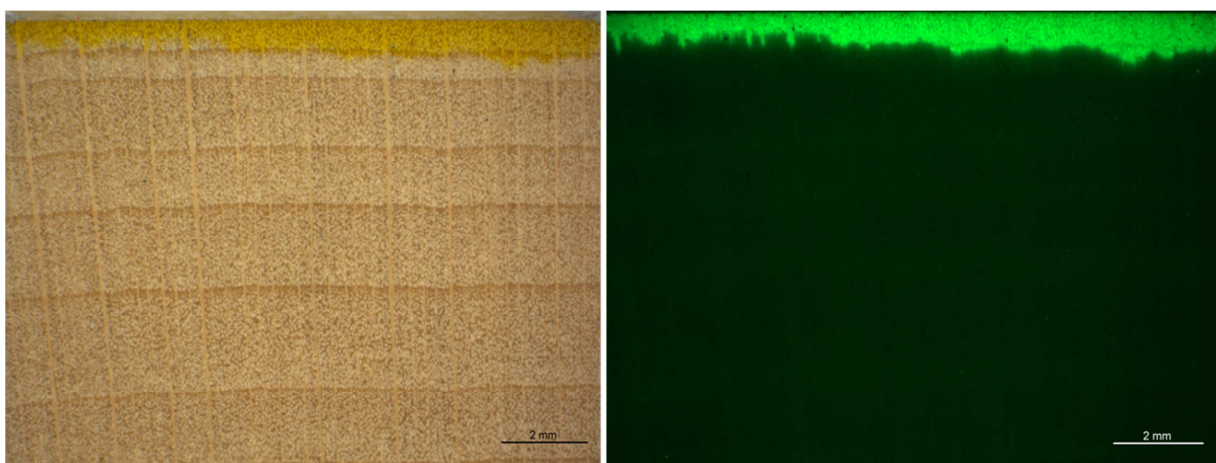


Abbildung 6: Eindringen der Berberinlösung in unverkerntes Buchenholz

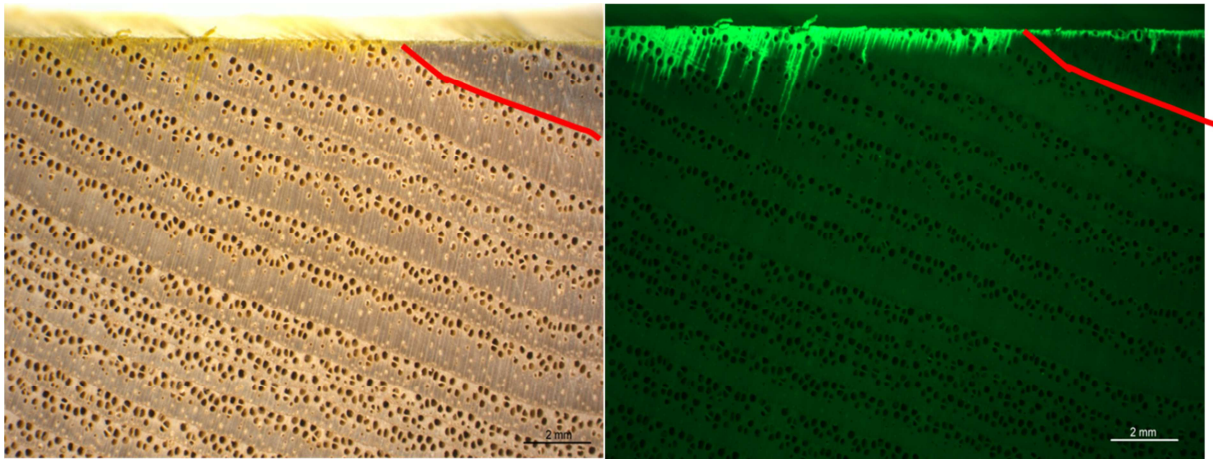


Abbildung 7: Eindringen der Berberinlösung im Bereich eines Braunkernrandes bei Eschenholz (Kernrand mit roter Linie kenntlich gemacht)

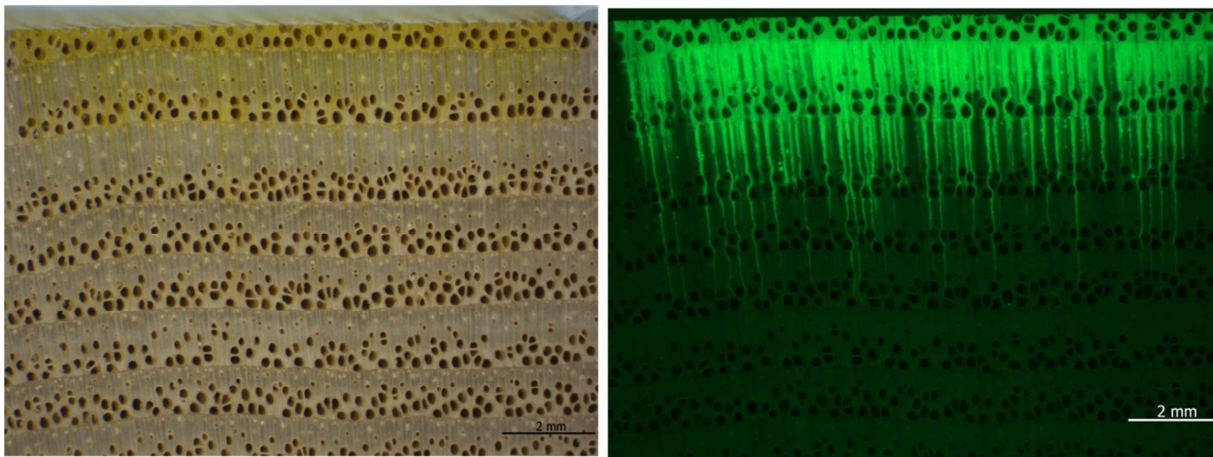


Abbildung 8: Eindringen der Berberinlösung in unverkerntes Eschenholz

5.2.2 Extraktstoffgehalt

- Die mit Wasser löslichen Extraktstoffe unterscheiden sich zwischen den untersuchten Holzarten erheblich. Erwartungsgemäß am höchsten war die Masse der gelösten Extraktstoffe für Lärchenholz. Deutlich weniger Inhaltsstoffe gingen bei Fichte und farbkerniger Buche in Lösung.
- Die mittleren Extraktstoffgehalte für rot- und spritzkernige Buche sind ebenfalls in Tabelle 5 aufgeführt. Auch hier wurde eine schließende statistische Untersuchung

mittels eines zweiseitigen t-Tests durchgeführt⁹. Signifikante Unterschiede wurden nicht festgestellt.

- Die Masse der Inhaltsstoffe, die sich aus farbverkerntem Buchenholz gewinnen ließ, war deutlich geringer als diejenige, die aus unverkernter Buche extrahiert werden konnte. Für Eschenholz wurde eine ähnliche Beobachtung gemacht. Auch wenn die Unterschiede nicht so deutlich waren wie bei Buchenholz, war dennoch ein Einfluss der Farbverkernung erkennbar.

5.2.3 pH-Wert

- Die gemessenen pH-Werte wurden nicht nur von der Holzart, sondern auch von der gewählten Messmethode und dem Alter der Oberfläche beeinflusst. Die niedrigsten pH-Werte wurden immer an frisch gehobelten Oberflächen gefunden. Die höchsten pH-Werte wurden bei Buche und Fichte in den wässrigen Auszügen gemessen. Hingegen waren die Werte für Esche und Lärche an gealterten Holzoberflächen maximal.
- Die pH-Werte von rot- und spritzkerniger Buche wurden ebenfalls anhand verschiedener Methoden bestimmt und sind in Tabelle 5 aufgelistet. Mit Hilfe eines zweiseitigen t-Tests wurde eine schließende statistische Untersuchung der Daten durchgeführt¹⁰. Es zeigte sich, dass die Unterschiede zwischen den jeweiligen Mittelwerten nicht signifikant und Abweichungen mit einer Vertrauenswahrscheinlichkeit von 95% nicht systematisch sind. In der Veröffentlichung wurden daher die Ergebnisse für die beiden Kerntypen zusammengefasst und als farbkernige Buche bezeichnet.
- Vergleicht man die pH-Werte unverkernter und farbkerniger Buche, so wird deutlich, dass die Werte für letztere Gruppe unabhängig von der verwendeten Messmethode stets geringfügig höher waren. Die Unterschiede zwischen den Mittelwerten waren statistisch signifikant. Auch ein paarweiser Vergleich der Mittelwerte zwischen rot-

⁹Die Voraussetzungen für die Verwendung dieses Tests waren erfüllt. Die Messwerte waren normalverteilt (überprüft mit Kolmogorov-Smirnov-Test) und Varianzhomogenität war gegeben (überprüft mit Levene Test).

¹⁰Die Voraussetzungen für die Verwendung dieses Tests waren erfüllt. Die Messwerte waren normalverteilt (überprüft mit Kolmogorov-Smirnov-Test) und Varianzhomogenität war gegeben (überprüft mit Levene Test).

bzw. spritzkernigen pH-Werten mit denen nicht farbkerniger Buche erbrachte signifikante Unterschiede.

- Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Holzarten waren teilweise erheblich. Beispielsweise betrug die mittlere Differenz zwischen den pH-Werten gemessen auf frischen Oberflächen von Lärche und Esche etwa 1,8. Da die Klebstoffsysteme allerdings primär auf die Verklebung von Fichtenholz ausgerichtet sind, ist der Vergleich mit dieser Holzart von besonderer Bedeutung. Die mittleren Differenzen zwischen Fichte und unverkerntem bzw. farbkernigem Buchenholz sind bei frisch gehobelten Oberflächen gering (Δ 0,28 bzw. 0,33), nehmen bei gealterten Oberflächen zu (Δ 0,29 bzw. 0,45) und sind maximal bei pH-Werten, die in wässrigen Auszügen bestimmt wurden (Δ 0,32 bzw. 0,59).

5.2.4 Säurepufferungsvermögen

- Um eine Absenkung des pH-Werts auf einen Zielwert von pH 3 zu erreichen, mussten den wässrigen Auszügen der verschiedenen Holzarten ganz unterschiedliche Säuremengen zugesetzt werden. Das Vermögen die zugegebene Säure zu puffern, war bei Esche maximal und bei Lärche minimal.
- Erhebliche Abweichungen zwischen Buche und Fichte sind insbesondere bei unverkernter Buche gegeben. Für die Absenkung des pH-Werts ist bei nicht farbkerniger Buche etwa die doppelte Menge an Salzsäure notwendig. Obwohl zu Beginn der Titration der pH-Wert der farbkernigen Buche im Mittel um Δ 0,59 über dem der Fichte bzw. um Δ 0,27 über dem pH-Wert der unverkernten Buche lag, war hier die notwendige Säuremenge mit 3,73 mmol HCl/100g deutlich geringer als bei nicht farbkerniger Buche.
- Die Mittelwerte für rot- und spritzkerniges Buchenholz sind in Tabelle 5 enthalten. Statistisch signifikante Unterschiede zwischen den beiden Kerntypen sind nicht vorhanden. Die beiden Stichproben gehören mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % der gleichen Grundgesamtheit an.

- Betrachtet man die Titrationskurven von Fichte und nicht farbkerniger Buche genauer, so wird deutlich, dass bei Ersterer bei gleicher Säurezugabe eine schnellere Absenkung des pH-Werts einsetzt; bereits bei einer Zugabe von 0,5 mmol HCl/100g sank der pH-Wert um etwa 2,0.
- Einen deutlichen Einfluss der Farbverkernung auf das Säurepufferungsvermögen zeigte sich sowohl für Buche als auch für Esche. Im Vergleich zu den unverkernten Referenzproben war für ein Absenken des pH-Werts bei farbkerniger Buche im Mittel nur etwa 40% der Stoffmenge an Salzsäure notwendig. Auch für Eschenholz war ein Unterschied gegeben, wenngleich dieser nicht so deutlich ausgeprägt war.

5.3 Entwicklung einer Methode zur Charakterisierung des Verfestigens einer Leimfuge (Teilarbeit III)

Die Ergebnisse der Teilarbeit III wurden im Jahr 2010 veröffentlicht (Schmidt et al., 2010b¹¹). In die Publikation konnten zunächst nur Resultate für rotkerniges Buchenholz einbezogen werden. Zwischenzeitlich wurden auch Messungen mit spritzkerniger Buche durchgeführt und die Resultate in Tabelle 6 aufgenommen. Die Ergebnisse für Fichte, die bereits in Teilarbeit III veröffentlicht wurden, sind in die Tabelle 6 integriert. Dies soll den Vergleich zwischen den Holzarten erleichtern.

¹¹Bei den Bezeichnungen der beiden MUF-Klebstoffe kam es zu einer Verwechslung. Der in Teilarbeit I als MUF-1 bezeichnete Klebstoff wurde in Teilarbeit III als MUF-2 ausgewiesen (vgl. Kapitel 4).

Tabelle 6: Reduktion des Spaltabstandes in μm , maximale Kraft (F_{max}) in N und verbrauchte Energie (w) in J zur Trennung der Füge­teile für unverkerntes, rot- und spritzkerniges Buchen- sowie für Fichtenholz in Abhängigkeit von der geschlossenen Wartezeit (Mittelwerte)

Wartezeit	Holzart	MUF-schnell				MUF-langsam			
		Anzahl Mes-sungen	Reduktion Spalt-abstand	F_{max}	w	Anzahl Mes-sungen	Reduktion Spaltabstand	F_{max}	w
30	Buche unverkernt	6	43,4	16,7	1,3	2	33,5	12,5	0,7
	Buche rotkernig	8	24,1	11,4	1,3	4	12,4	8,1	0,7
	Buche spritzkernig	2	27,1	12,8	1,2	3	14,0	8,4	0,7
	Fichte	6	26,1	17,9	1,3	2	32,6	13,9	1,0
60	Buche unverkernt	7	52,4	37,6	6,1	2	60,6	24,8	2,1
	Buche rotkernig	9	33,9	33,6	6,1	4	21,0	16,6	3,1
	Buche spritzkernig	3	29,7	31,7	5,9	2	23,5	15,3	2,4
	Fichte	6	36,7	27,4	4,1	2	40,7	21,5	2,5
80	Buche unverkernt	2	48,2	50,4	12,2				
	Buche rotkernig	2	27,0	37,3	7,4				
	Buche spritzkernig	2	35,9	35,6	7,0				
	Fichte	6	41,4	38,9	9,0				
90	Buche unverkernt					2	51,0	39,0	7,3
	Buche rotkernig					4	31,4	23,8	6,2
	Buche spritzkernig					2	31,8	24,2	6,6
	Fichte					5	46,5	28,3	6,0

Im Folgenden sind die wichtigsten Ergebnisse der Teilarbeit III zusammengefasst:

- Das Eindringen des Klebstoffgemisches in die Füge­teile kann indirekt über die Verkleinerung des Abstandes zwischen den beiden Füge­teilen in Echtzeit beobachtet werden. Die maximal benötigte Kraft und die notwendige Energie sind Kennwerte, die sich während des Trennvorgangs der beiden Füge­teile gewinnen lassen und Rückschlüsse auf das Verfestigen des Klebstoffes während der geschlossenen Wartezeit erlauben.

Rückgang des Spaltabstandes

- Der Rückgang des Spaltabstandes wurde vorrangig von der Holzart beeinflusst. In unverkerntes Buchenholz drangen beide Klebstoffgemische besonders schnell ein. In der Regel lag der Rückgang des Spaltabstandes deutlich über dem der Fichtenprüfkörper. Gleichzeitig hatte aber auch die individuelle Beschaffenheit der Füge­teiler­fläche maßgebliche Auswirkungen auf das Eindringverhalten des Klebstoffgemisches. Bei dem zerstreutporigen und damit homogenen Buchenholz traten diese Streuungen in deutlich geringerem Umfang auf.
- Unterschiede zwischen rot- und spritzkernigem Buchenholz sind nicht vorhanden. Bei beiden Kerntypen verringerte sich der Spalt in einem ähnlichen Umfang.
- Vergleicht man die Resultate für unverkerntes und farbkerniges Material, zeigt sich, dass bei letzterem der Abstand zwischen den beiden Füge­teilen nicht in gleichem Umfang zurückging. Das Vorhandensein eines Farbkerns führte bei beiden MUF-Leimen zu einem vergleichsweise verzögerten Eindringen des Klebstoffgemisches. Zumeist blieb die Reduktion des Spaltabstandes bei farbkerniger Buche sogar deutlich hinter dem für Fichtenholz zurück. Auch bei Eschenholz war ein Einfluss des Farbkerns erkennbar; die Auswirkungen sind jedoch insgesamt geringer als bei Buche.

Maximal aufgewandte Kraft für das Trennen der beiden Fügeiteile

- Bis zum vollständigen Trennen der beiden Fügeiteile wurde die Kraft gemessen, die notwendig war, um den Trennprozess mit einer vorgegebenen Geschwindigkeit auszuführen. Die hierbei gemessene Maximalkraft ist ein Maß für das Verfestigen des Klebstoffes. Die bereits zuvor bekannten Unterschiede hinsichtlich der Geschwindigkeit des Verfestigens der beiden MUF-Klebstoffe (vgl. Kapitel 4) wurden mit der neuen Methode bestätigt.
- Für das Trennen von Fügeiteilen aus unverkernter Buche und Fichte waren unabhängig vom Klebstofftyp und der geschlossenen Wartezeit hohe Maximalkräfte erforderlich. Vergleichsweise geringere Kräfte waren hingegen für die Trennvorgänge bei Esche und Douglasie notwendig.
- Unterschiede zwischen rot- und spritzkernigem Buchenholz wurden nicht festgestellt.
- Fasst man die beiden Kerntypen der Buche zusammen und vergleicht diese mit unverkerntem Buchenholz, zeigt sich, dass bei letzterem die maximal aufzubringende Kraft während des Trennvorgangs immer geringer war. Diese Unterschiede waren bei allen Wartezeiten und bei beiden Klebstofftypen vorhanden. Ein derart eindeutiger Einfluss der Farbverkernung war bei Eschenholz nicht gegeben. Generelle Aussagen über den Einfluss eines vorhandenen Farbkerns sind daher nicht möglich, sondern müssen offenbar holzartenspezifisch beantwortet werden.

Notwendige Energie zum vollständigen Trennen der beiden Fügeiteile

- Der Trennvorgang war immer erst dann beendet, wenn keine Kraft mehr benötigt wurde, um den Prozess mit einer definierten Geschwindigkeit auszuführen. Eine Analyse der Messwerte zeigte, dass die Energie ebenfalls dazu geeignet ist, zwischen schnellen und langsamen Klebstoffsystemen zu unterscheiden.
- Die benötigte Energie erlaubt eine eingeschränkte Differenzierung zwischen den einzelnen Holzarten; intraspezifische Abweichungen sind bei Buchenholz nur bei

einzelnen Parameterkombinationen gefunden worden. Deutliche Unterschiede wie bei der maximal aufzubringenden Kraft waren nur in Einzelfällen vorhanden. In der Regel lagen die Werte nahe zusammen.

**Zusammenhänge zwischen dem Rückgang des Spaltabstandes, der maximal aufgewandten Kraft und der notwendigen Energie für das Trennen der beiden Füge-
teile**

- Da die Datenbasis für die einzelnen Holzarten begrenzt ist, wurden die Zusammenhänge in Teilarbeit III unabhängig von der Holzart ausschließlich explorativ analysiert und ein Verfahren (Rangkorrelation nach Spearman) gewählt, das auch bei einem geringen Datenumfang verlässliche Resultate liefert und gleichzeitig robust gegenüber Ausreißern ist. Die Korrelationskoeffizienten deuten darauf hin, dass das Eindringen des Klebstoffgemisches in das Holz nur bedingt mit der maximal aufgewandten Kraft (r_s zwischen 0,35 bis 0,45) oder der notwendigen Energie für das Trennen der Füge-
teile (r_s zwischen 0,42 bis 0,52) in Zusammenhang steht.

Für Buchenholz wurden die einzelnen Werte noch einmal gesondert betrachtet: Obwohl die Mittelwerte einen Zusammenhang zunächst vermuten lassen, hat eine Analyse der einzelnen Messdaten ergeben, dass der Rückgang des Spaltabstandes nicht in jedem Fall mit einem deutlichen Anstieg der beiden anderen Variablen verknüpft ist.

6 Diskussion

6.1 Delaminierung und Scherfestigkeit (Teilarbeit I)

6.1.1 Delaminierung

Teilarbeit I ermöglicht Aussagen zur Klebefugenbeständigkeit bei Buchenholz auf einer breiten Datenbasis. Bisherige Arbeiten zu diesem Thema stützen sich auf einen kleineren Untersuchungsumfang. Jedoch konnte auch in Teilarbeit I nicht immer mit einer Vielzahl von Wiederholungen gearbeitet werden: Aus farbkernigem Material wurde immer nur ein kleinformatiger Träger für die jeweilige geschlossene Wartezeit hergestellt und geprüft, da mehrere Wiederholungen auf Grund des hohen Schnittholzbedarfes nicht möglich waren. Obwohl insgesamt 17 Buchenholzstammabschnitte speziell für diesen Untersuchungszweck eingeschnitten wurden, standen vollständig farbverkernte Schnitthölzer, die zudem fehlerfrei waren, eine liegende Jahrringlage aufwiesen und keinen störenden Einfluss der Markröhre hatten, nur in begrenztem Umfang zur Verfügung. Um dennoch möglichst viele farbkernige Prüfkörper zu untersuchen, wurden auch zwei Träger mit Lamellen aufgebaut, deren Jahrringlage dem Typ Rift oder Halbrift entsprachen. Da die Jahrringlage die induzierten Spannungen beeinflusst (vgl. Kapitel 2.2.1.1.2), sind die Ergebnisse für diese beiden Träger immer nur begrenzt mit den anderen Resultaten vergleichbar. Buchenholzträger, aufgebaut aus nicht farbkernigen Lamellen, konnten hingegen in hoher Stückzahl hergestellt und eine Vielzahl von Prüfkörpern konnten aus diesen herausgetrennt und geprüft werden. Das begrenzt vorhandene farbkernige Schnittholzmaterial wurde hingegen gezielt zum Aufbau von Trägern mit Wartezeiten von 60 und 90 Minuten verwendet, da sich bereits frühzeitig abzeichnete, dass sich mit dem Klebstoffsystem MUF-langsam und einer geschlossenen Wartezeit von 30 Minuten sowohl mit Verfahren I als auch mit Verfahren II nicht in jedem Fall eine ausreichende Fugenbeständigkeit erzielen lässt. Es wurde daher nur ein Träger mit rotkernigen Lamellen hergestellt, dessen Fugenbeständigkeit in toto unzureichend war und weit hinter den Ergebnissen für unverkerntes Buchenholz zurückblieb.

Die Beständigkeit von Klebefugen zwischen rot- und spritzkernigen Buchenholzlamellen wurde nur für das System MUF-langsam überprüft, da nicht genügend farbkernige Lamellen

zur Verfügung standen. Inwieweit eine Übertragung auf andere MUF-Systeme möglich ist, kann somit nicht beurteilt werden. In Vorversuchen wurde allerdings mit dem Klebstoff MUF-schnell im Zusammenwirken mit rotkernigem Buchenholz bereits eine ausreichend hohe Fugenbeständigkeiten festgestellt. Systematische Untersuchungen fehlen aber bisher.

Das Erkennen und Bewerten von Fugenöffnungen bedarf einer gewissen Erfahrung und ist oftmals nicht einfach (vgl. Kapitel 2.2.1.1.1). Die Beurteilung bei Buchenholz ist jedoch sehr viel einfacher als bei anderen Holzarten; die aufgetretenen Delaminierungen konnten immer eindeutig identifiziert werden. Häufig kam es zu einem Bruch in der Klebstofffuge, direkt zwischen der Klebstoffschicht und der angeklebten Holzlamelle. Dieses Bruchbild ist visuell eindeutig feststellbar und lässt auf eine mangelnde Adhäsion schließen. Holzfaseranhaftungen an der Klebstoffschicht wurden in der Regel nicht gefunden.

Da die positiven Ergebnisse der Delaminierungsprüfung für die nachfolgende bauaufsichtliche Zulassung von BSH aus Buche von weitreichender Bedeutung waren, wurden Parallelversuche in den Laboreinrichtungen der Materialprüfungsanstalt (MPA) in Stuttgart durchgeführt. Es zeigte sich, dass die mit den Prüfeinrichtungen der Holzforschung München erzielten Resultate valide sind.

Erstmalig konnte mit den Ergebnissen der Teilarbeit I der Nachweis erbracht werden, dass sich beim Verkleben von farbkernigem und unverkerntem Buchenholz hohe Fugenbeständigkeiten erzielen lassen, die den baurechtlichen Anforderungen für tragende Holzbauteile genügen. Zudem wurden für die beiden MUF-Klebstoffe Herstellparameter bestimmt, die eingehalten werden müssen, um eine ausreichende Beständigkeit zu erreichen. Nur wenn eine geschlossene Wartezeit von 30 Minuten unterschritten wird, kann mit den verwendeten Klebstoffsystemen keine ausreichende Fugenbeständigkeit erzielt werden. Damit unterscheiden sich die Ergebnisse der Teilarbeit I deutlich von den Resultaten von Aicher und Reinhardt (2007). Ein Vergleich der in Teilarbeit I erzielten Ergebnisse mit den Resultaten von Ohnesorge et al. (2010) und Frühwald et al. (2003) ist nur bedingt zielführend, da in diesen Arbeiten Prüfverfahren mit einer geringeren Belastungsintensität verwendet wurden (vgl. Kapitel 2.2.1.1.4).

Auch wenn für die Unterschiede zu den Ergebnissen von Aicher und Reinhardt (2007) eine ganze Reihe von Faktoren verantwortlich sein könnten, sind die Ursachen primär bei den verwendeten Materialien, der Vorbereitung der Lamellen oder bei der Herstellung der Träger zu suchen. Offensichtlich ist Folgendes: Während Aicher und Reinhardt (2007) beim Aufbau der

Träger auf Lamellen mit einer Stärke von 36 bzw. 48 Millimeter zurückgriffen, wurden in Teilarbeit I ausschließlich Lamellen mit 30 Millimeter verwendet. Dass die Stärke der Lamellen einen Einfluss auf die Klebefugenbeständigkeit hat, wurde bereits von Frühwald et al. (2003) und Ohnesorge et al. (2010) beschrieben bzw. nachgewiesen. Bei Verwendung stärkerer Lamellen werden im Bereich der Klebefuge höhere Spannungen ausgelöst (Truax und Selbo, 1948).

Trotz der absoluten Unterschiede zwischen den Ergebnissen, ist dennoch eine Gemeinsamkeit erkennbar: Auch mit dem von Aicher und Reinhardt (2007) verwendeten MUF-Klebstoff konnten bei längeren geschlossenen Wartezeiten tendenziell bessere Resultate erzielt werden. Insbesondere verbesserte sich die Fugenbeständigkeit bei der Verklebung rotkerniger Lamellen. Geringere Delaminierungen beobachteten auch Ohnesorge et al. (2010), wenn die Pressung nach längeren geschlossenen Wartezeiten einsetzte.

Gründe für den Einfluss der Wartezeit wurden bereits in Teilarbeit I diskutiert. Es wurde vermutet, dass bei kürzeren Wartezeiten die Klebstoffviskosität noch niedrig ist und es beim Einsetzen des vergleichsweise hohen Pressdrucks von $1,2 \text{ N/mm}^2$ zu einem exzessiven Klebstoffaustritt aus der Fuge sowie einem tiefen Eindringen des Gemisches in das Holzgewebe kommt. Dies hat zur Folge, dass keine oder nur eine extrem dünne Fuge ausgebildet wird. Die lichtmikroskopischen Aufnahmen haben dies wiederholt gezeigt. Ähnliche Ergebnisse legten Knorz et al. (2013) vor. In dieser Untersuchung wurde der Zusammenhang zwischen Fugendicke und geschlossener Wartezeit bei der Verklebung von Esche systematisch erfasst und quantifiziert. Es zeigte sich, dass unabhängig vom verwendeten Klebstofftyp bei kurzen Wartezeiten nur eine sehr dünne Klebefuge ausgebildet wird und die Beständigkeit der Klebeverbindung in diesem Fall besonders unzureichend war.

Der vermehrte Klebstoffaustritt wurde beim Schließen der Presse beobachtet, aber nicht quantitativ erfasst. Referenziert wird diese subjektive und rein visuelle Beobachtung mit dem Klebstoffaustritt, der beim Verkleben von Fichten- und Douglasienholz mit einem Pressdruck von $0,7 \text{ N/mm}^2$ bzw. $1,0 \text{ N/mm}^2$ gemacht wurde (Schmidt und Knorz, 2010). Wartezeiten und Klebstoffsysteme waren mit denen in Teilarbeit I identisch. Während die Beobachtungen zum Klebstoffaustritt letztendlich nicht belastbar sind, ist hingegen das tiefe Eindringen des Klebstoffgemisches in das Holzgewebe anhand der lichtmikroskopischen Aufnahmen dokumentiert. Bis zu einer Entfernung von maximal $1.800 \mu\text{m}$ wurden Reste des Klebstoffes in den Lumina von Gefäßen gefunden. Auffällig hierbei war, dass das Klebstoffgemisch besonders

tief in das Holzgewebe der Lamelle eindrang, auf die der Klebstoff aufgetragen wurde, während in das oben liegende Fügeteil ein reduziertes Eindringen zu beobachten war.

Durch eine Verlängerung der Wartezeit steigt aber nicht nur die Viskosität des Klebstoffgemisches an, sondern es ist darüber hinaus denkbar, dass dem niedrigviskosen Gemisch die notwendige Zeit gegeben wird, in die anatomischen Feinstrukturen des Fügeteils einzudringen. In Arbeiten zum Penetrationsverhalten von in situ polymerisierenden Klebstoffen (Sernek et al., 1999; Hass, 2012) wurde das Eindringen in die Zellwände von Buchenholz allerdings noch nicht untersucht. Bisherige Nachweise beschränken sich auf Fichte (Gindl et al. 2002). Geht man davon aus, dass der in situ polymerisierende MUF-Klebstoff tatsächlich in die Zellwände eindringt, so könnte es aufbauend auf der Theorie von Frihart (2009) zu einer reduzierten Quellung des Holzes im Bereich der Grenzfläche kommen und dadurch die Fugenbeständigkeit bei Feuchteinfluss erhöht werden (vgl. Kapitel. 2.2.1.1.2). Im Gegensatz dazu könnte eine gezielte Erhöhung der Ausgangsviskosität des Klebstoffgemisches diesen positiven Effekt möglicherweise verhindern, da es dem Gemisch nicht mehr möglich ist in die Feinstrukturen einzudringen. Belässt man die Ausgangsviskosität hingegen niedrig, verwendet aber ein schneller verfestigendes System, könnte die gegebene Zeitspanne zum Eindringen in die Zellwände zeitlich nicht ausreichend sein.

Ein Einfluss einer vorhandenen Farbverkernung auf die Ergebnisse der Delaminierungsprüfung war nur bei einer geschlossenen Wartezeit von 30 Minuten erkennbar. Die insgesamt schon unzureichende Klebefugenbeständigkeit war bei rotkernigen Fügeteilen noch zusätzlich herabgesetzt. Dieses Ergebnis stimmt auch mit den Resultaten von Aicher und Reinhardt (2007) für rotkerniges Buchenholz überein. Offenbar wirkt sich eine Farbverkernung bei kurzen Wartezeiten besonders negativ aus.

6.1.2 Scherfestigkeitsprüfung

Die in Teilarbeit I gemessenen Scherfestigkeiten lagen im Mittel etwa 2 bis 3 N/mm² über den Festigkeiten, die Aicher und Reinhardt (2007) sowie Ohnesorge et al. (2010) mit MUF-Klebstoffen feststellten. Ähnlich hohe Scherfestigkeiten wie in Teilarbeit I wurden auch in der umfangreichen Arbeit von Walther (2002) veröffentlicht. Allerdings streuen die Festigkeiten bei Walther (2002) erheblich: Die niedrigsten Werte lagen für einen PU-Klebstoff bei etwa 10 N/mm², während mit einem PRF-Klebstoff regelmäßig 20 N/mm² erreicht wurden. Da Walther (2002) die Lamellen bereits nach einer offenen Wartezeit von zehn Minuten fügte

und verpresste, ist ein Vergleich mit den Resultaten der Teilarbeit I nur eingeschränkt möglich.

Generell lassen sich die Scherfestigkeiten in verschiedenen Arbeiten nur schwer miteinander vergleichen, da es trotz hoher Sorgfalt bei der Durchführung der Prüfungen leicht zu systematischen Fehlern kommen kann. Steiger et al. (2010) haben auf die vielfältigen Probleme bei der Ermittlung der Scherfestigkeit hingewiesen. Unterschiede im Aufbau der verwendeten Prüfeinrichtungen führen regelmäßig zu nicht einheitlichen Beanspruchungen im Bereich der Klebefuge. Die tatsächlich vorhandenen Festigkeiten werden so über- bzw. unterschätzt. Höhere Messwerte werden beispielsweise erzielt, wenn die verwendete Prüfapparatur eine Druckspannung erzeugt, die senkrecht auf die Fuge einwirkt. In diesem Fall ist der effektiv in der Scherfuge herrschende Spannungszustand nicht mehr reiner Schub, sondern eine Kombination aus beiden.

Letztendlich lässt sich nicht beurteilen, ob die hohen Festigkeiten der Teilarbeit I auf eine systematische Überschätzung zurückzuführen sind oder ob die Leimfugen tatsächlich eine besonders hohe Festigkeit aufwiesen. Bei zukünftigen Untersuchungen sollte geprüft werden, ob man die von Steiger et al. (2010) entwickelte Prüfeinrichtung verwendet. Die Autoren verweisen darauf, dass die Prüfkörper bei Verwendung dieser Einrichtung einem weitestgehend definierten Scherspannungszustand ausgesetzt sind und sich die Ergebnisse verschiedener Untersuchungen daher leichter miteinander vergleichen lassen.

Ein Einfluss der Farbverkernung auf die Ergebnisse der Scherfestigkeitsprüfung war in Teilarbeit I nicht gegeben. Nur bei einer geschlossenen Wartezeit von 30 Minuten waren die Holzbruchanteile im Vergleich zu längeren Wartezeiten geringfügig reduziert. Die niedrigen Bruchanteile, die Walther (2002) bei der Verklebung von rotkernigem Buchenholz mit einem MUF-Klebstoff beobachtete, konnten nicht bestätigt werden. Möglicherweise sind die von Walther (2002) festgestellten Auffälligkeiten auf die geringen Wartezeiten zurückzuführen, die in dieser Untersuchung eingehalten wurden und sich bei farbkernigem Buchenholz besonders bemerkbar machen. In Teilarbeit I waren die Wartezeiten durchwegs länger als bei Walther (2002). Auch Ohnesorge et al. (2010) fanden keine Auffälligkeiten im Hinblick auf einen Farbkern: Weder bei den Holzbruchanteilen noch bei den Festigkeiten waren Besonderheiten im Zusammenhang mit rotkernigem Buchenholz erkennbar. Aicher und Reinhardt (2007) veröffentlichten lediglich die Festigkeitswerte und verzichteten auf die Angabe der dazugehörigen Holzbruchanteile. Die Festigkeiten waren auch bei den Klebefugen zwischen rotkernigen Fügeteilen nicht geringer als die bei nicht farbverkerntem Buchenholz.

Vergleicht man die Resultate der Scherfestigkeitsprüfung mit denen der Delaminierung so ist überraschend, dass auch bei den kurzen geschlossenen Wartezeiten sowohl Festigkeit als auch Holzbruchanteil hoch waren, obwohl nur eine unzureichende Klebstoffuge ausgebildet wurde.

6.2 Charakterisierung verklebungsrelevanter Holzeigenschaften von Buche (Teilarbeit II)

6.2.1 Wasseraufnahmevermögen

Die in Teilarbeit II ermittelten Wasseraufnahmekoeffizienten lagen sowohl für Buche als auch für Fichte unter den von Boehme und Hora (1996) gemessenen bzw. berechneten Werten; die relativen Unterschiede zwischen Buchen- und Fichtenholz sind allerdings ähnlich. Ursächlich hierfür könnte neben zufälligen Variationen des untersuchten Materials, die unterschiedliche Größe der Holzfläche sein, über die das Wasser aufgenommen wurde. Während Boehme und Hora (1996) kreisrunde Prüfkörper mit einer Fläche von etwa 180 mm² verwendeten, erfolgte in Teilarbeit II die Wasseraufnahme über eine rechteckige Holzfläche mit 11.200 mm². Eine größere Fläche wurde gewählt, damit etwaige Messfehler oder eine ungewollte Wasseraufnahme über die versiegelten Randflächen weniger stark ins Gewicht fallen. Allerdings ist die rechteckige Flächenform ungünstiger als die von Boehme und Hora (1996) gewählte Kreisform, da das Verhältnis von Umfang zu Flächeninhalt abnimmt. Eine weitere denkbare Ursache für die Unterschiede zu den Ergebnissen von Boehme und Hora (1996) könnte die Vorbereitung der Holzoberflächen sein. Während Boehme und Hora (1996) geschliffene Holzoberflächen verwendeten, wurden diese in Teilarbeit II frisch gehobelt. Darüber hinaus ist bei der Messung eine hohe Sorgfalt erforderlich, damit am Prüfkörper anhaftendes Wasser nicht die Ermittlung der aufgenommenen Wassermenge verfälscht.

Niemz et al. (2005) berechneten für Fichtenholz Koeffizienten, die insgesamt näher an den absoluten Werten der Teilarbeit II lagen, diese aber immer noch überstiegen.

Weitgehend gut stimmen die in Teilarbeit II ermittelten Koeffizienten mit den Resultaten von Sonderegger et al. (2012) überein. Für Fichtenholz sind die berechneten Koeffizienten nahezu identisch. Die Kennziffer für nicht farbkerniges Buchenholz wurde mit $0,176 \text{ kg/m}^2\text{h}^{-0,5}$

angegeben und liegt damit deutlich näher an den in Teilarbeit II berechneten Koeffizienten, als der von Boehme und Hora (1996) veröffentlichte Wert mit $0,2704 \text{ kg/m}^2\text{h}^{-0,5}$. Eine größere Diskrepanz zwischen den Ergebnissen der Teilarbeit II und denen von Sonderegger et al. (2012) ist nur für Eschenholz gegeben. Eine Erklärung für diese Abweichung ist nicht erkennbar.

Die Ergebnisse der Teilarbeit II zeigen einen deutlichen Einfluss der Farbkernbildung bei Buche und Esche auf das Wasseraufnahmevermögen pro Zeiteinheit. Vergleichswerte aus dem Schrifttum liegen für rot- und spritzkerniges Buchen- sowie für braunkerniges Eschenholz bisher nicht vor. Ursächlich für die reduzierte Wasseraufnahme sind möglicherweise die anatomischen Veränderungen, die während der Bildung des Farbkerns auftreten. Da in der Literatur übereinstimmend berichtet wird, dass es zwischen rot- und spritzkernigem Buchenholz keine anatomischen Unterschiede gibt, überrascht es nicht, dass die Wasseraufnahme sehr ähnlich bzw. identisch verläuft. Sowohl die Verthyllung der Gefäße als auch die Einlagerung phenolischer Inhaltsstoffe in das parenchymatische Gewebe tragen scheinbar dazu bei, die Wasseraufnahme über die tangentialen Flächen zu verringern. Insbesondere das Vermögen, Wasser über die radial verlaufenden Holzstrahlen aufzunehmen, ist reduziert bzw. kommt im Kernrandbereich völlig zum Erliegen. Besonders auffällig war dies bei Esche. Die weitergehenden Untersuchungen zur Wasseraufnahme mittels einer Berberinlösung zeigten, dass die Aufnahme teilweise zum Erliegen kommt, wenn das dichtere Spätholz der Esche innerhalb eines Braunkerns mit Flüssigkeit beaufschlagt wird.

Auffällig bei der Datenanalyse der Wasseraufnahmekoeffizienten war, dass die Messwerte der beiden Laubhölzer ähnlich streuten: Die Variationskoeffizienten für farbkerniges und nicht farbverkerntes Buchen- und Eschenholz waren mit etwa 18% bis 21% größer als für Fichtenholz, das einen Variationskoeffizienten von 10% aufwies. Auch Niemz et al. (2005) und Sonderegger et al. (2012) fanden bei Fichte Variationskoeffizienten von 8% bzw. 10% vor. Für nicht farbkernige Buche stellten Sonderegger et al. (2012) hingegen nur einen Variationskoeffizienten von ca. 9,5% fest; für Eschenholz war dieser deutlich höher und lag mit etwa 18% auf dem Niveau der Teilarbeit II. Ganz offensichtlich verläuft die Wasseraufnahme bei Fichtenholz einheitlicher als bei Esche. Sollte sich die große Streuung der Messwerte in Teilarbeit II für Buchenholz in nachfolgenden Untersuchungen bestätigen, wäre dies überraschend, da das zerstreutporige Holz der Buche in seinen Eigenschaften homogener ist als beispielsweise das ringporige Eschenholz.

Eine größere Streuung der Wasseraufnahme führt dazu, dass sich das Abbinden von Klebstoffen schwer abschätzen lässt. Bestätigt sich die in Teilarbeit II gefundene Variation der Wasseraufnahmekoeffizienten, so ist beim Abbinden von Klebstoffen nicht nur die auftretende Farbkernbildung, sondern auch die Variation der Wasseraufnahme, die bei farbkerniger und unverkernter Buche vorhanden ist, zu berücksichtigen.

Die Ergebnisse lassen vermuten, dass die im Vergleich zu Fichtenholz schnellere Wasseraufnahme von Buche und Esche auch zu einem schnelleren Entweichen des Dispersionsmittels führt und sich hierdurch die Abbindegeschwindigkeit von MUF-Klebstoffen erhöht. Auch das Abbinden der PVAc-Anteile in den MUF-Systemen geht schneller vonstatten. Besonders während der geschlossenen Wartezeit wirkt sich die erhöhte Wasseraufnahme des Holzes aus, da die Evaporation in den Hintergrund tritt. Bei einem zu schnellen Abbinden wandert das Lösungsmittel zu schnell ab und die chemische Reaktion läuft nicht vollständig ab. In der Folge kommt es zu einer geringen Bindefestigkeit, da das Klebstoffgemisch nur antrocknet (River et al., 1991).

6.2.2 Extraktstoffe

In Teilarbeit II wurde auf qualitative Analysen der gelösten Inhaltsstoffe verzichtet, die Erkenntnisse über die Zusammensetzung der Extraktstoffe geliefert hätten. Die kaltwasserlöslichen Extraktstoffe wurden ausschließlich quantitativ erfasst, da detaillierte Erkenntnisse zu den Inhaltsstoffen im farbkernigem Buchenholz bereits von Koch (2004) vorgelegt wurden. Demnach sind für die Farbgebung im Wesentlichen Catechin-Derivate und 2,6-Dimethoxybenzochinon verantwortlich. Diese hochmolekularen phenolischen Inhaltsstoffe kommen vornehmlich im Parenchymgewebe vor und können nur mit Methanol bzw. Aceton extrahiert werden. Mit Wasser lassen sich hingegen Kohlenhydrate, wie zum Beispiel die beiden Monosaccharide Glucose und Fructose gut lösen. Im Farbkernholz sind diese Substanzen nur in sehr geringen Konzentrationen von 0,03 bis 0,01% bezogen auf atro Holz vorhanden, während im unverkernten Buchenholz ein Niveau von ca. 1% erreicht wird (Koch, 2004). Vor diesem Hintergrund lassen sich die unterschiedlichen Mengen der Extraktstoffe, die in Teilarbeit II aus farbkernigem und unverkerntem Buchenholz gelöst wurden, erklären: Im Farbkernholz gingen die farbgebenden, hochmolekularen Inhaltsstoffe nicht oder nur in geringem Umfang in Lösung. Zudem sind deutlich weniger Kohlenhydrate vorhanden, die gelöst werden konnten. Die geringere Konzentration von Polysacchariden könnte auch die Ur-

sache für die geringere Konzentration von Formationen sein, die Schneider et al. (2000) in kaltwässrigen Extrakten vorfanden. Wurden die zunächst vorhandenen Polysaccharide bereits für den Aufbau hochmolekularer, farbgebender Inhaltsstoffe weitgehend aufgebraucht, so kann bei der technischen Trocknung des Holzes weniger Ameisensäure gebildet werden, was letztendlich auch die Acidität des Holzes beeinflusst.

Mit der in Teilarbeit II gewählten Extraktionsmethode wird die Acidität des Holzes nicht vollumfänglich beschrieben, da neben den flüchtigen organischen Säuren auch die nicht löslichen Stoffe einen Beitrag zur Acidität des Holzes leisten. Diese sauren Bestandteile können mittels Natriumacetat aus dem Holz gewonnen und die Gesamt-Acidität des Holzes durch eine nachfolgende Titration bestimmt werden (Subramanian et al., 1983). An insgesamt fünf nordamerikanischen Holzarten bestimmten Subramanian et al. (1983) die Gesamt-Acidität und konnten nachweisen, dass das Aushärten von der Gesamt-Acidität abhängt. Zwischen der Gelierzeit eines UF-Klebstoffes vermengt mit Holzmehl verschiedener Holzarten und deren Gesamt-Acidität bestand eine etwas engere Korrelation als mit den pH-Werten der jeweiligen Holzarten, die ausschließlich an wässrigen Auszügen bestimmt wurden. Da es jedoch nur zu einer marginalen Verbesserung der Korrelationskoeffizienten kam und zudem die zugrundeliegenden Gelierzeiten¹² mit gewissen Ungenauigkeiten behaftet sein dürften (vgl. Kapitel 2.5.4), wurde in Teilarbeit II auf die Bestimmung der Gesamt-Acidität verzichtet.

6.2.3 pH-Wert

Bei allen Untersuchungen der Teilarbeit II wurden die Messungen an einer vergleichsweise hohen Anzahl an Holzproben durchgeführt. Da die chemischen Analysen mit einem erheblichen Aufwand verbunden sind, wurde in vergleichbaren Untersuchungen mit deutlich weniger Wiederholungen gearbeitet. Zudem ist die Aussagekraft der Ergebnisse umfassender, weil die pH-Werte mit verschiedenen Verfahren gemessen wurden und diese in Relation zum jeweiligen Extraktstoffgehalt, der nahezu für alle Proben bestimmt wurde, gesetzt werden können. Insbesondere die Messung des pH-Werts auf unterschiedlich alten Holzoberflächen wurde in diesem Umfang bisher noch nicht durchgeführt.

Ein Vergleich mit pH-Werten aus der Literatur ist schwierig, da nicht immer eindeutig dargelegt wurde, ob es sich bei dem untersuchten Material um technisch getrocknetes Holz

¹²Subramanian et al. (1983) verwendeten die von Johns und Niazi (1980) gemessenen Gelierzeiten.

handelte und man daher mit einem abgesenktem pH-Wert rechnen muss (vgl. Kapitel 2.3.2.2). Zudem lassen die Angaben in der Literatur nicht immer zweifelsfrei erkennen, ob das untersuchte Material tatsächlich farbverkernt war. Aus diesem Grund werden die Arbeiten von Frühwald et al. (1988) und Sandermann und Rothkamm (1959) nicht in die Diskussion einbezogen; die Ergebnisse von Seeling (1992) nur teilweise. In Teilarbeit II wird auch auf die Arbeit von Mehringer (1989) verwiesen. Jedoch ist die Beschreibung des Untersuchungsmaterials bei Mehringer (1989) ebenfalls unzureichend für die Fragestellung dieser Arbeit, da nicht differenziert dargestellt wurde, um welchen Farbkerntyp es sich im Einzelnen handelt.

Obwohl die verwendeten Methoden teilweise unterschiedlich waren, kann dennoch festgehalten werden, dass die Resultate der Teilarbeit II in folgendem Punkt mit den Ergebnissen aus der Literatur übereinstimmen: Seeling (1992), Albert et al. (1999) und Schneider et al. (2000) fanden bei rotkernigem Buchenholz leicht höhere pH-Werte vor als in den nicht farbverkernten Referenzproben. Auch in Teilarbeit II wurde dieser Unterschied bei allen Messreihen festgestellt, wenngleich die absoluten Differenzen der pH-Werte nur gering waren. Insbesondere bei den pH-Messungen auf den Holzoberflächen lagen die absoluten Werte sehr nahe zusammen; dennoch waren die Unterschiede statistisch signifikant.

Nicht in Einklang mit den Angaben in der Literatur stehen die Resultate der Teilarbeit II mit den von von Büren (2002) veröffentlichten Werten. Von Büren (2002) führte die Messungen ausschließlich an wässrigen Suspensionen durch. Während die pH-Werte für das rotkernige Holz gut übereinstimmen, weichen die Werte für die unverkernten Referenzproben voneinander ab. Die Werte bewegen sich zwischen pH 6,0 und 6,5. Diese pH-Werte liegen nicht nur über dem Niveau der in Teilarbeit II gemessenen Werte, sondern auch über den Werten einer ganzen Reihe anderer Arbeiten (z. B. Mehringer, 1989; Albert et al., 1999; Schneider et al., 2000). Die absoluten Unterschiede betragen etwa pH 0,5 bis 1,0. Die pH-Werte des rotkernigen Holzes liegen bei von Büren (2002) somit unter den Werten für die unverkernten Referenzproben. Wodurch sich diese vergleichsweise höheren pH-Werte für das nicht farbkerne Buchenholz ergeben, lässt sich nicht nachvollziehen, da von Büren (2002) die Ergebnisse nicht im Kontext der vorhandenen Literatur diskutiert.

Die pH-Werte für spritzkerniges Buchenholz überstiegen bei allen Messreihen der Teilarbeit II nicht die Werte für die unverkernten Referenzproben. Die absolute Differenz zwischen Spritzkern und Referenz war auf frisch gehobelten Holzoberflächen am geringsten. Die Resultate der Teilarbeit II können nur mit den Ergebnissen von Bürens (2002) verglichen werden, da bisher für spritzkerniges Buchenholz keine weiteren Untersuchungen vorliegen.

Auffällig bei diesem Vergleich ist, dass in Teilarbeit II die pH-Werte für spritzkerniges Buchenholz nur in geringem Maße schwankten und keine nennenswerten Unterschiede zu rotkernigem Buchenholz auftraten. Hingegen streuten bei von Büren (2002) die Werte deutlich und lagen teilweise weit über (pH 7,1) oder unter (pH 4,2) den Referenzproben, die aus den umliegenden farbkernfreien Randbereichen stammten. Schmidt und Mehringer (1989) haben in Abhängigkeit des gewählten Bakterienstamms sowohl eine Alkalisierung als auch eine Ansäuerung der Kapillarflüssigkeit vorgefunden; häufiger als eine Ansäuerung war jedoch eine Alkalisierung. Verfärbungen wurden immer nur im Zusammenhang mit einer Alkalisierung beobachtet.

Bei der Diskussion der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass sowohl von von Büren (2002) als auch in Teilarbeit II das spritzkernige Holz bakteriologisch nicht analysiert wurde (vgl. Kapitel 4). Die Resultate der Teilarbeit II deuten darauf hin, dass ein Spritzkern nicht notwendigerweise mit einer Verschiebung des pH-Werts verbunden ist. Möglicherweise besaßen die drei für die Teilarbeit II zufällig ausgewählten Buchenstämme jedoch auch einen Spritzkern, der nicht bakteriologisch induziert war und es daher auch nicht zu einer Veränderung des pH-Werts kam.

Will man die Ergebnisse hinsichtlich der Auswirkungen auf die Verklebung von Vollholz beurteilen, ist es sinnvoll, sich auf die pH-Werte zu konzentrieren, die an den frisch gehobelten Holzoberflächen gemessen wurden. Die Ergebnisse der Teilarbeit II stimmen mit den von Scheikl (1994) ausschließlich an nicht farbkernigen Buchenholzoberflächen gemessenen Werten überein. Auch Scheikl (1994) fand einen mittleren pH-Wert von etwa 5,0 vor. Die Streuung der Messwerte bewegte sich in einem ähnlichen Bereich. Unterschiede zwischen den beiden Untersuchungen zeigen sich bei Fichtenholz: Die pH-Werte von Scheikl (1994) liegen um etwa pH 0,4 unter denen der Teilarbeit II. Hierbei muss man jedoch beachten, dass das Niveau der in Teilarbeit II gemessenen pH-Werte für Fichte insgesamt etwas höher ist als in vergleichbaren Untersuchungen. Beispielsweise sind auch die pH-Werte in den wässrigen Auszügen etwas alkalischer im Vergleich zu den Literaturwerten (z. B. Jung und Roffael, 2002). Dies ist insofern von Bedeutung, da die pH-Werte der Fichte offenbar stärker variieren, als die Streuungen der einzelnen Untersuchungen erwarten lassen und die absoluten Differenzen zwischen Fichte und Buche größer sein können, als es die Ergebnisse der Teilarbeit II zunächst suggerieren.

Welche Auswirkungen die gemessenen pH-Werte auf das Verfestigen säurehärtender Klebstoffe haben, kann anhand der Ergebnisse nur abgeschätzt werden. Hierfür müssen die

Ergebnisse im Vergleich mit den Resultaten für das Fichtenholz betrachtet werden, für das die Klebstoffsysteme primär ausgelegt sind. Unterschiede zwischen den beiden Holzarten sind zwar vorhanden, jedoch dürften diese nur einen geringen Einfluss auf das Aushärten eines MUF-Klebstoffes haben. Auch die auf Grund einer Farbverkernung bei Buchenholz gegebenen intraspezifischen Differenzen sind nicht dazu geeignet, das Aushärten in einen größeren Umfang zu verzögern. In Voruntersuchungen konnte Jánosi (2010) mittels Gelierzeitmessungen zeigen, dass die unterschiedlichen Buchenfarbkerntypen mit ihren abweichenden pH-Werten keinen Einfluss auf das Aushärten haben.

6.2.4 Säurepufferungsvermögen

Die in Teilarbeit II festgestellten relativen Unterschiede von Fichte und Lärche im Vergleich zur hohen Säurepufferkapazität der Buche stimmen mit den Resultaten von Sandermann und Rothkamm (1959) überein. Obwohl Sandermann und Rothkamm (1959) eine andere Methode zur Bestimmung der Säurepufferkapazität verwendeten, wurden ganz ähnliche Unterschiede zwischen den beiden Nadelhölzern und dem Buchenholz gefunden. Nicht deckungsgleich sind hingegen die Ergebnisse für Eschenholz: Während in Teilarbeit III ein hohes Vermögen zur Säurepufferung festgestellt wurde, bewegte sich dieses bei Sandermann und Rothkamm (1959) nur geringfügig über dem Niveau von Fichte und Lärche. Allerdings fokussierten Sandermann und Rothkamm (1959) sich in ihrer Untersuchung auf die Erarbeitung einer Übersicht für eine Vielzahl von Holzarten, weshalb wiederholte Messungen für die einzelnen Holzarten nicht durchgeführt wurden. Interspezifische Unterschiede zwischen den einzelnen Holzarten sind teilweise auch bei der Streuung der Messwerte vorhanden. Die Variationskoeffizienten für farbkerniges und nicht farbverkerntes Buchen- sowie Eschenholz bewegten sich zwischen 12% und 19%, während für Fichtenholz ein Koeffizient von unter 7% ermittelt wurde.

Wie bei den anderen verklebungsrelevanten Holzeigenschaften wurden auch beim Säurepufferungsvermögen keine Unterschiede zwischen rot- und spritzkernigem Buchenholz festgestellt. Sowohl der Verlauf der Titrationskurven als auch die absolute Menge an Säure, die benötigt wurde, um einen pH-Wert von 3 zu erreichen, waren sehr ähnlich.

Interessant ist, dass sich das Säurepufferungsvermögen für rotkerniges Buchenholz und die basische Pufferkapazität tendenziell ähnlich sind. In beiden Fällen wird eine 50% geringere

Stoffmenge einer Base (Schneider et al., 2000) oder eine 32% geringere Menge einer Säure benötigt als bei der unverkernten Referenz.

Das Säurepufferungsvermögen ist abhängig von den gelösten Extraktstoffen, die sich in den jeweiligen Auszügen befinden. Bei farbkerniger Buche sind deutlich weniger Stoffe in Lösung gegangen als bei unverkernter Buche. Beschränkt man sich auf eine rein quantitative Betrachtung, so könnte man zu dem Schluss kommen, dass eine Absenkung des pH-Werts umso schneller und mit weniger Säure möglich wird, je weniger Extraktstoffe in Lösung gehen. Dass diese quantitative Betrachtung unzureichend ist, wird beim Vergleich mit anderen Holzarten deutlich. So lässt sich zwar aus Lärchenholz eine große Menge an Stoffen lösen, gleichzeitig ist aber das Säurepufferungsvermögen gering. Um die Ursachen für diese spezifischen Unterschiede herauszufinden, bedarf es einer qualitativen Analyse der Extraktstoffe. Da in Teilarbeit II eine grundlegende Charakterisierung der verklebungsrelevanten Eigenschaften vorgenommen wurde, die primär auf den Vergleich zwischen den Holzarten ausgelegt war, wurde auf eine qualitative Analyse verzichtet.

Während das alkalische Pufferungsvermögen für Fichte und Buche ähnlich ist (Jung und Roffael, 2002), ist das Vermögen eine Säure zu puffern ganz unterschiedlich. Für das Aushärten von Klebstoffen könnte dieser Unterschied von weitreichender Bedeutung sein: Alkalisch härtende Phenol- und Tannin-Formaldehyd-Harze finden bei Buche und Fichte annähernd gleiche Voraussetzungen vor. Tritt hingegen ein säurehärtendes System mit Buchenholz in Wechselwirkung, steht für die chemische Aushärtung ein gewisser Anteil der Protonen nicht zur Verfügung. Ist der Anteil der Säure limitiert, da beispielsweise eine nicht abgestimmte Menge an Härter verwendet wurde, ist es vorstellbar, dass es zu einer verzögerten Aushärtung kommt. Inwieweit dies allerdings bei den hier betrachteten MUF-Systemen tatsächlich der Fall ist, kann aus den Ergebnissen der Teilarbeit III nicht abgeleitet werden.

6.3 Entwicklung einer Methode zur Charakterisierung des Verfestigens einer Leimfuge (Teilarbeit III)

Das vorgestellte Messverfahren ähnelt in weiten Teilen bereits etablierten Prüfmethode zur Bestimmung der Klebrigkeit von Haftklebstoffen oder der Zügigkeit von Druckfarben (z. B.

Mezger, 2010). Bei diesen Prüfungen steht allerdings die Charakterisierung des flüssigen oder festen Materials im Mittelpunkt. Die Charakterisierung erfolgt über die maximal benötigte Kraft und die notwendige Energie, die sich beide aus den aufgelaufenen Messwerten nach Beendigung des Trennvorgangs berechnen lassen.

In Teilarbeit III wurde das Prinzip dieser Verfahren abgeändert und erweitert: Zum einen wurde die bei der Prüfung von Haftklebstoffen übliche Phase des Andrückens mit einer definierten Spannung vollständig weggelassen. Zum anderen wurde die Wechselwirkung zwischen dem untersuchten Material und dem Füge teil einbezogen, da über die Verkleinerung des Abstandes zwischen den beiden Füge teilen das Eindringen des Klebstoffgemisches in die Füge teile indirekt bestimmt werden kann. Dass es zu keinen größeren Verdunstungsverlusten während der Messung kam, die möglicherweise zu einem Überschätzen des Eindringens geführt hätten, konnte mittels eines normalen Platte/Platte-Messsystems ohne Holzfüge teile gezeigt werden. Bei diesen Messungen wurde während der üblichen Messzeiträume keine wesentliche Reduktion des Spaltabstandes festgestellt. Der maximal gemessene Rückgang betrug bei einer Wartezeit von 60 Minuten lediglich 2 μm . Diese Verluste fallen in Anbetracht der beobachteten Reduktionen zwischen den Holzfüge teilen, die bis zu 60 μm betragen, nicht ins Gewicht. Offenbar konnten Verdunstungsverluste im Grenzbereich zwischen Klebstoff und umgebender Atmosphäre durch das Abdecken mit einer Haube und das Einstellen einer konstanten Temperatur nahezu verhindert werden.

Die vorgestellte Methode spiegelt allerdings nicht vollständig die Situation wider, die sich während der geschlossenen Wartezeit zwischen zwei Lamellen in der Praxis einstellt. Bei der Herstellung kleinformatiger Träger für die Delaminierungsprüfung werden die Lamellen nach dem Auftrag des Klebstoffgemisches unverzüglich gefügt und übereinander in die Pressvorrichtung eingelegt. Der Kontakt zwischen Klebstoff und Füge teil ist somit durch die Eigenmasse der Füge teile gewährleistet. Sofern in Holzleimbetrieben vertikale Blockpressen verwendet werden, lagern auch hier die Lamellen im Pressbett zeitweise übereinander, bevor der Pressdruck einsetzt. Jedoch sind die Verhältnisse in den Betrieben heterogen. Nicht nur weil unterschiedliche Typen von Pressen verwendet werden, sondern weil auch die Lamellen vielfach verformt sind und somit der enge Kontakt zwischen Klebstoff und Holzoberfläche, wie er unter Laborbedingungen sichergestellt ist, nicht durchgängig gegeben ist. Zwar ist auch bei der in Teilarbeit III vorgestellten Methode gewährleistet, dass während der gesamten geschlossenen Wartezeit ein enger Kontakt zwischen Klebstoffgemisch und Füge teil besteht, allerdings wird kein zusätzlicher Druck aufgebracht, wie er durch die Eigenmasse der

Lamellen entsteht. Mit der verwendeten Messapparatur könnten zwar diese geringen Drücke aufgebracht und somit die tatsächliche Situation simuliert werden, jedoch wurde hierauf verzichtet, da die verschiedenen Rohdichten der Holzarten folglich auch unterschiedliche Druckspannungen notwendig gemacht hätten und somit die Vergleichbarkeit zwischen den Holzarten nicht mehr gegeben gewesen wäre. Will man derartige Druckspannungen aufbringen, ist zu beachten, dass diese in der Realität in Abhängigkeit von der Position des Fügeteils innerhalb eines Trägers für jede Klebefuge unterschiedlich sind.

Um Zusammenhänge zwischen dem Rückgang des Spaltabstandes, der maximal aufgewandten Kraft und der notwendigen Energie für das Trennen der beiden Fügeiteile aufzudecken, wurde ausschließlich eine Methode der explorativen Datenanalyse herangezogen. Es zeigte sich, dass das Eindringen des Klebstoffgemisches in das Holz zwar zu einem Anstieg der aufgewendeten Kraft und der notwendigen Energie führt, jedoch konnte die ursprüngliche Vermutung, dass ein ausgeprägter Rückgang des Spaltabstandes auch mit einem schnellen Verfestigen verbunden ist, nur bedingt bestätigt werden. Der Korrelationskoeffizient nach Spearman zeigte, dass ein gewisser Zusammenhang zwischen den jeweiligen Messwertpaaren vorhanden ist, jedoch war die Korrelation nicht so stark ausgeprägt wie eingangs erwartet. Für schließende statistische Untersuchungen, mit denen man auch holzartenspezifische Besonderheiten herausarbeiten kann, war der Datenumfang zu gering.

Die Ergebnisse der Teilarbeit III können nicht mit Literaturwerten verglichen werden, da bisher keine weiteren Untersuchungen mit dieser Methode durchgeführt wurden.

7 Synthese

In den drei Publikationen werden verschiedene Teilaspekte der Verklebung von Buchenholz betrachtet: Die allgemeine Charakterisierung des Holzmaterials, das Verfestigen der Klebefugen nach dem Fügen und vor dem Einsetzen des Pressdrucks sowie die Delaminierungsbeständigkeit fertig ausgebildeter Klebefugen bei stark wechselnden Holzfeuchten. Die Teilergebnisse werden nachfolgend zusammengeführt.

Dauerhafte Klebeverbindungen zwischen Fügeteilen aus Buchenholz lassen sich mit MUF-Klebstoffen nur dann herstellen, wenn eine bestimmte geschlossene Wartezeit eingehalten wird. Das Einhalten einer vergleichbaren Mindestwartezeit ist bei der Verklebung von Fichtenholz nicht notwendig. Besonders sensibel auf die Nichteinhaltung einer gewissen Wartezeit reagierte die Fugenbeständigkeit bei farbkernigem Buchenholz. Erfreulich ist allerdings, dass eine zufriedenstellende Verklebung sowohl bei unverkernter als auch bei farbkerniger Buche mit der gleichen Wartezeit möglich ist. Somit kann Buchenholz ohne Berücksichtigung einer eventuell vorhandenen Rot- oder Spritzkernigkeit verklebt werden. Eine Sortierung der Lamellen im Hinblick auf die Verklebung ist folglich entbehrlich. Dieses Ergebnis ist von weitreichender Bedeutung für die Herstellung von tragenden Holzbauteilen aus Buchenholz und legt die Basis dafür, dass eine wirtschaftliche Produktion entsprechender Bauteile überhaupt möglich wird.

Die Resultate der Teilarbeit I haben zudem gezeigt, dass für die Beurteilung der Klebefugenbeständigkeit die weit verbreitete Scherfestigkeitsprüfung ungeeignet ist. Dieses Prüfverfahren erlaubte nur im Einzelfall Rückschlüsse auf die Delaminierungsbeständigkeit der Verklebung bei Buchenholz. Diese Erkenntnis hat bereits Eingang in die Qualitätssicherung von BSH aus Buche gefunden: Die entsprechende allgemeine bauaufsichtliche Zulassung¹³, die bereits im Herbst 2009 erteilt und im Jahre 2013 verlängert wurde, schreibt die Delaminierungsprüfung zwingend vor.

Zunächst wurde vermutet, dass bestimmte verklebungsrelevante Holzeigenschaften, die das Verfestigen des Klebstoffgemisches verzögern, ursächlich für die erforderliche Einhaltung einer Mindestwartezeit sind. Lichtmikroskopische Aufnahmen von Klebefugen unterstützen die Vermutung, dass ein verlangsamtes Verfestigen in Zusammenhang mit dem hohen Press-

¹³Nummer der Zulassung Z-9.1-679

druck zu einem Auspressen des Gemisches aus der Fuge führt oder der Klebstoff tief in die Füge­teile gedrückt wird und dadurch keine ausreichende Fugenbeständigkeit entsteht. Da die verklebungsrelevanten Eigenschaften des Buchenholzes bis dato nur teilweise in der Literatur beschrieben waren und nicht ausgeschlossen werden konnte, dass es zudem erhebliche intra­spezifische Abweichungen auf Grund der Farbkernbildung gibt, wurden diese Eigenschaften in Teilarbeit II umfassend charakterisiert. Es zeigte sich, dass das Wasseraufnahmevermögen von Holz sowohl inter- als auch intraspezifische Besonderheiten aufweist. Die festgestellten Abweichungen sind erheblich und dazu geeignet, das Abbinden von Klebstoffen zu be­schleunigen. Insbesondere unverkerntes Buchenholz zeichnet sich durch ein hohes Wasser­aufnahmevermögen aus. Signifikant niedrigere Werte, die sich nur geringfügig über dem Niveau von Fichtenholz bewegten, hatte rot- und spritzkerniges Buchenholz.

Die Charakterisierung der chemischen Eigenschaften erbrachte hingegen Ergebnisse, die im Hinblick auf das Aushärten von säurehärtenden Klebstoffen differenziert zu bewerten sind. Die pH-Wertuntersuchungen offenbarten erwartungsgemäß interspezifische Unterschiede: Im Vergleich mit den Resultaten für Fichtenholz, für das die Klebstoffsysteme primär ausgelegt sind, sind die pH-Werte auf den frisch gehobelten Oberflächen von Buchenholz geringfügig weiter in den alkalischen Bereich verschoben. Daher dürften diese Unterschiede nur einen untergeordneten Einfluss auf das Aushärten eines MUF-Klebstoffes haben. Aussagekräftiger für das Aushärten dürfte jedoch das Säurepufferungsvermögen sein. Das erhöhte Pufferungs­vermögen des unverkernten Buchenholzes könnte durchaus das Aushärten verlangsamen. Ein entsprechender Nachweis kann jedoch nicht erbracht werden, da eine derartige Ursache­Wirkungs-Beziehung aufgrund fehlender Verfahren und der Komplexität des Untersuchungs­materials nicht möglich ist. Das erhöhte Säurepufferungsvermögen ist daher nur ein Indiz, welches eine verlangsamte Aushärtung begünstigen kann. Signifikante Unterschiede zwischen farbkernigem und unverkerntem Buchenholz waren sowohl beim pH-Wert als auch bei der Säurepufferung gegeben. Die Auswirkung des Farbkerns auf die beiden chemischen Kenn­werte ist jedoch interessant: Während der pH-Wert geringfügig erhöht war, war gleichzeitig das Säurepufferungsvermögen reduziert.

Einen tieferen Einblick in die Vorgänge während der geschlossenen Wartezeit erlaubt die neuentwickelte Methode, die in Teilarbeit III vorgestellt wurde. Das schnelle Eindringen des Klebstoffgemisches bzw. der Rückgang des Spaltabstands bei Buchenholz stimmt gut mit den Ergebnissen des Wasseraufnahmevermögens überein. In unverkerntes Buchenholz dringt das Gemisch besonders schnell ein. In farbkerniges Buchenholz geschieht dies hingegen ver-

zögert, aber dennoch schneller als bei Fichtenholz. Auch die Festigkeitsentwicklung und die für das Trennen der beiden Füge­teile notwendige Energie lassen den Schluss zu, dass das Verfestigen des Klebstoffgemisches bei Buchenholz während der geschlossenen Wartezeit nicht verzögert abläuft. Die Resultate zeigen sogar den gegenteiligen Effekt: Während der geschlossenen Wartezeit ist bei unverkerntem Buchenholz ein schnellerer Anstieg der Werte zu beobachten als bei Fichtenholz. Auch bei farbkerniger Buche war kein verlangsamtes Verfestigen festzustellen. Die Messwerte bewegen sich vielmehr auf dem Niveau von Fichtenholz. Eine Erklärung für diesen schnellen Anstieg der Festigkeit bei unverkerntem Buchenholz könnte das hohe Wasseraufnahmevermögen sein, das ein schnelles Abbinden des PVAc-Anteils auslöst.

Die ursprüngliche Vermutung, dass es bei Buchenholz während der geschlossenen Wartezeit zu einem verlangsamten Verfestigen des primär säurehärtenden Klebstoffgemisches kommt, kann somit verworfen werden. Warum dennoch eine längere geschlossene Wartezeit erforderlich ist, um eine ausreichende Klebefugenbeständigkeit zu erreichen, kann nur vermutet werden: Zum einen erscheint es denkbar, dass es aufgrund des hohen Pressdruckes zu einem Auspressen des Klebstoffgemisches kommt, wenn das Gemisch noch nicht ein bestimmtes Viskositätsniveau erreicht hat. Eine andere Möglichkeit ist, dass das MUF-Klebstoffgemisch einen gewissen Zeitraum benötigt, um in die Zellwände des Buchenholzes einzudringen und es erst dann zu einer positiven Stabilisierung der Zellwände kommt, die bei wechselnden Holzfeuchten vorteilhaft ist.

8 Literaturverzeichnis

- Aicher, S.; Reinhardt, H. -W. (2007): Delaminierungseigenschaften und Scherfestigkeiten von verklebten rotkernigen Buchenholzlamellen. *Holz als Roh- und Werkstoff* 65 (2), S. 125–136.
- Aicher, S.; Stapf, G. (2007): Verklebte Vollholzprodukte aus Eiche. Schlussbericht für den Holzabsatzfonds. Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart. Stuttgart.
- Albert, L.; Hofmann, T.; Németh, Z. I.; Rétfalvi, T.; Koloszar, J.; Varga, S.; Csepregi, I. (2003): Radial variation of total phenol content in beech (*Fagus sylvatica* L.) wood with and without red heartwood. *Holz als Roh- und Werkstoff* 61 (3), S. 227–230.
- Albert, L.; Nemeth, L. J.; Halasz, G.; Koloscar, J.; Varga, Sz.; Takacs, L. (1999): Radial variation of pH and buffer capacity in the red-heartwooded beech (*Fagus sylvatica* L.) wood. *Holz als Roh- und Werkstoff* 57 (1), S. 75–76.
- Albritton, R. O.; Short, P. H. (1979): Effects of extractives from pressure-refined hardwood fiber on the gel time of urea-formaldehyde resin. *Forest Products Journal* 29 (2), S. 40–41.
- Aufseß, H. von; Schulz, H.; Mößnang, M. (1985): Ein ungewöhnlicher Spritzkern an Buche (*Fagus sylvatica* L.) und seine Auswirkung auf die Druckfestigkeit. *Holz als Roh- und Werkstoff* 43 (8), S. 350.
- Back, E. L. (1991): Oxidative activation of wood surfaces for glue bonding. *Forest Products Journal* 41 (2), S. 30–36.
- Bauch, J.; Schmidt, O.; Yazaki, Y.; Starck, M. (1985): Significance of Bacteria in the Discoloration of Ilomba Wood (*Pycnanthus angolensis* Exell). *Holzforschung* 39 (5), S. 249–252.
- Bock, E. (1952): Die Prüfung der Festigkeit von Leimverbindungen während des Abbindens des Leimes. *Holz als Roh- und Werkstoff* 10 (10), S. 394–398.
- Boehme, C.; Hora, G. (1996): Water absorption and contact angle measurement of native European, North American and Tropical wood species to predict gluing properties. *Holzforschung* 50 (3), S. 269–276.
- Bolton, A. J.; Humphrey, P. E. (1977): Measurement of the tensile strength development of urea formaldehyde resin-wood bonds during pressing at elevated temperatures. *Journal of the Institute of Wood Science* 7 (5), S. 11–14.
- Bonsen, K. J. M. (1991): Technologische Konsequenzen verschlossener Gefäße, insbesondere für das Buchenholz. *Schweizerische Zeitschrift für das Forstwesen* 142 (11), S. 925–935.
- Bosshard, H. H. (1967): Über die fakultative Farbkernbildung. *Holz als Roh- und Werkstoff* 25 (11), S. 409–416.
- Bröcker, F. W.; Blaik, U. (1986): Strength tests for the evaluation of timber glued joints. *Holz als Roh- und Werkstoff* 44 (3), S. 114.
- Bucur, V. (2011): *Delamination in Wood, Wood Products and Wood-Based Composites*. Dordrecht: Springer Science+Business Media B.V.
- Büren, S. von (1998): Buchenrotkern: Erkennung, Verbreitung und wirtschaftliche Bedeutung. *Schweizerische Zeitschrift für das Forstwesen* 149 (12), S. 955–970.

- Büren, S. von (2002): Der Farbkern der Buche (*Fagus sylvatica* L.) in der Schweiz nördlich der Alpen: Untersuchungen über die Verbreitung, die Erkennung am stehenden Baum und die ökonomischen Auswirkungen. Beiheft zur Schweizerischen Zeitschrift für Forstwesen, 86.
- Clad, W. (1960): Die Beurteilung von Harnstoff-Harzleimen auf Grund ihrer Prüfung. Holz als Roh- und Werkstoff 18 (10), S. 391–400.
- Clad, W. (1961): Bedeutung und Bestimmung der Gelierzeit von Harnstoffharz-Leimen. Holz als Roh- und Werkstoff 19 (1), S. 22–26.
- Custódio, J.; Broughton, J.; Cruz, H. (2009): A review of factors influencing the durability of structural bonded timber joints. International Journal of Adhesion and Adhesives 29 (2), S. 173–185.
- Deppe, H. J.; Schmidt, K. (1979): Vergleichende Lang- und Kurzzeit-Bewitterungsprüfungen an Holzwerkstoffen. Holz als Roh- und Werkstoff 37 (8), S. 287–294.
- Deppe, H. J.; Schmidt, K. (1982): Zur Beurteilung von Holzwerkstoffen im Kurzzeit-Bewitterungsversuch. Holz als Roh- und Werkstoff 40 (12), S. 471–473.
- Deppe, H. J.; Schmidt, K. (1994): Ergänzende Untersuchungen zum Alterungsverhalten gestreckter Holzmontageverleimungen. Holz als Roh- und Werkstoff 52 (6), S. 355–360.
- Deppe, H. J.; Schmidt, K. (2004): Prüfung von Brettschichtholzverleimungen. Holz-Zentralblatt (16), S. 208–209.
- Dietrichs, H. H. (1964): Chemisch-physiologische Untersuchungen über die Splint-Kern-Umwandlung der Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) - ein Beitrag zur Frage der Holzverkernung. Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Holzwirtschaft, 58. Hamburg.
- Dix, B.; Roffael, E. (1995): Zum Verhalten des Splint- und Kernholzes der Lärche (*Larix decidua*) bei der Herstellung von feuchtebeständigen Spanplatten unter Einsatz verschiedener Bindemittel. Holz als Roh- und Werkstoff 53 (6), S. 357–367.
- Dunky, M.; Niemz, P. (2002): Holzwerkstoffe und Leime. Technologie und Einflussfaktoren. Berlin: Springer.
- Egner, K.; Kolb, H. (1966): Geleimte Träger und Binder aus Buchenholz. Bauen mit Holz 68 (4), S. 147–154.
- Fengel, D.; Wegener, G. (1989): Wood. Chemistry, ultrastructure, reactions. Berlin, New York: Walter de Gruyter.
- Frihart, C. R. (2005): Adhesive bonding and performance testing of bonded wood products. ASTM Special Technical Publication 2 (7), S. 1–12.
- Frihart, C. R. (2009): Adhesive Groups and How They Relate to the Durability of Bonded Wood. Journal of Adhesion Science and Technology 23 (4), S. 601–617.
- Frühwald, A.; Krause, H. A.; Mehringer, H.; Reissner, J.; Schwab, E. (1988): Die Qualität des Holzes von Buchen aus immissionsgeschädigten Beständen. Arbeitsbericht aus dem Institut für Holzphysik und mechanische Technologie des Holzes. Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft. Hamburg.
- Frühwald, A.; Ressel, J.B.; Bernasconi, A.; Becker P.; Pitzner, P.; Wonnemann, R.; Mantau, U., Sörgel, C.; Thoroe, C.; Dieter, M.; Englert, H. (2003): Hochwertiges Brettschichtholz aus Buchenholz. Abschlussbericht. Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft. Hamburg.

- Garnier, S.; Pizzi, A.; Vorster, O. C.; Halasz, L. (2002): Rheology of polyflavonoid tannin–formaldehyde reactions before and after gelling. II. Hardener influence and comparison of different tannins. *Journal of Applied Polymer Science* 86 (4), S. 864–871.
- Gehri, E. (1985): Verbindungstechniken mit hoher Leistungsfähigkeit-Stand und Entwicklung. *Holz als Roh- und Werkstoff* 43, S. 83-88.
- Gindl, W.; Dessipri, E.; Wimmer, R. (2002): Using UV-Microscopy to Study Diffusion of Melamine-Urea-Formaldehyde Resin in Cell Walls of Spruce Wood. *Holzforschung* 56 (1), S. 103–107.
- Glos, P.; Schmidt, M. (2008): Verklebung von Brettschichtholz aus Buche sowie aus Buche und Fichte mit Kauramin 683 flüssig und Kauramin Härter 688 flüssig. Prüfbericht. *Holzforschung München*. München.
- Gossler, A. (2009): Entwicklung der Festigkeit von Klebverbindung in Abhängigkeit von der Holzart. Bachelorarbeit. Technische Universität München, Studienfakultät für Forstwissenschaft und Ressourcenmanagement.
- Grostad, K. (2008): How do we produce our formaldehyd resins? Vortrag. Dynea AS, Lillestrøm, Norwegen, 19.05.2008.
- Grunwald, D. (2002): Kombinierte analytische Untersuchungen von Klebstoffen für Holzwerkstoffe. Dissertation. Technische Universität Braunschweig. Berlin, Braunschweig: Mensch & Buch Verl, 2002.
- Günsche, F. (2000): Verwendungsrelevante Qualitätsparameter von Buchenholz. Diplomarbeit. Technische Universität München, Studienfakultät für Forstwissenschaft und Ressourcenmanagement.
- Habenicht, G. (2006): Kleben - erfolgreich und fehlerfrei. 4., überarb. und erg. Aufl. Wiesbaden: Vieweg, Studium und Praxis Fertigungstechnik.
- Habenicht, G. (2009): Kleben. Grundlagen, Technologien, Anwendungen. 6., aktualisierte Aufl. Berlin: Springer, VDI-Buch.
- Halasz, L.; Vorster, O.; Pizzi, A.; Alphen, J. V. (2000): A rheological study of the gelling of UF polycondensates. *Journal of Applied Polymer Science* 75 (10), S. 1296–1302.
- Hapla, F.; Ohnesorge, D. (2005): Qualitätsorientierte Schnittholzausbeute in Abhängigkeit von Durchmesser und Rotkernanteil bei Buchenstammholz - ein Modellansatz mit unterschiedlichen Einschnittarten. *Holztechnologie* 4 (46), S. 5–9.
- Hartig, R.; Weber, R. (1888): *Das Holz der Rothbuche in anatomisch-physiologischer, chemischer und forstlicher Richtung*: Springer.
- Hass, P. F. S. (2012): Penetration behaviour of adhesives into solid wood and micromechanics of the bondline. Dissertation. ETH Zürich.
- Hennecke, U.; Roffael, E. (2005): Charakterisierung einiger auswaschbarer Stoffe in thermomechanisch gewonnen Holzstoffen der Buche. *Holz als Roh- und Werkstoff* 63 (6), S. 408–413.
- Hofferber, B. M.; Kolodka, E.; Brandon, R.; Moon, R. J.; Frihart, C. R. (2006): Effects of swelling forces on the durability of wood adhesive bonds. *Proceedings. 29th Annual Meeting of the Adhesion Society*. Jacksonville, Florida, USA, February 19-22.

- Hösli, J. P.; Bosshard, H. H. (1975): Überprüfung der Tränkbarkeit von rotkernigem Buchenholz mit Steinkohlenteeröl: Tränkerfolg in Abhängigkeit von der Thyllenhäufigkeit. Schweizerische Zeitschrift für das Forstwesen 126 (12), S. 865–875.
- Höwecke, B. (1998): Untersuchungen zum Farbkern der Buche (*Fagus sylvatica* L.) in Baden-Württemberg. Schweizerische Zeitschrift für das Forstwesen 149 (12), S. 971–990.
- Hse, C.; Kuo, M. (1988): Influence of extractives on wood gluing and finishing—a review. Forest Products Journal 38 (1), S. 52–56.
- Hückelheim, J. (2010): Die Entwicklung der Klebfugenfestigkeit von MUF-Klebstoffen bei Fichte, Esche und Lärche. Bachelorarbeit. Technische Universität München.
- Humphrey, P. E. (2008) mündliche Mitteilung. Sopron, Ungarn.
- Iwata, R.; Inagaki, N. (2006): Durable adhesives for large laminated timber. Journal of Adhesion Science and Technology 20 (7), S. 633–646.
- Janosi, K. (2010): Bestimmung der Gelierzeit von Klebstoffen in Abhängigkeit von der Holzart. Bachelorarbeit. Technische Universität München, Studienfakultät für Forstwissenschaft und Ressourcenmanagement.
- Johns, W. E.; Niazi, K. A. (1980): Effect of pH and buffering capacity of wood on the gelation time of urea-formaldehyde resin. Wood and Fiber 12 (4), S. 255–263.
- Jung, B.; Roffael, E. (2002): Über die Acidität einheimischer Holzarten. Holz als Roh- und Werkstoff 60 (2), S. 154.
- Kehr, E. (1962): Untersuchungen über die Eignung verschiedener Holzarten und -sortimente zur Herstellung von Spanplatten. Holztechnologie 3 (1), S. 23–28.
- Kehr, E.; Schilling, W. (1965): Untersuchungen über die Eignung verschiedener Holzarten und -sortimente zur Herstellung von Spanplatten. Holztechnologie 6 (4), S. 225–233.
- Keller, H. (1961): Vom Rotkern der Buche. Schweizerische Zeitschrift für das Forstwesen 8, S. 498–502.
- Keylwerth, R. (1962): Untersuchungen über freie und behinderte Quellung—Zweite Mitteilung: Behinderte Quellung. Holz als Roh- und Werkstoff 20 (8), S. 292–303.
- Klebes, J.; Mahler, G.; Höwecke, B. (1988): Holzkundliche Untersuchungen an Buchen mit neuartigen Waldschäden. Mitteilungen der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg. Freiburg.
- Klemmt, J. (1996): Untersuchungen zum Auftreten des Buchenfarbkerns in unterfränkischen Beständen. Diplomarbeit. Universität München, Forstwissenschaftliche Fakultät.
- Knoke, T.; Schulz Wenderoth, S. (2001): Ein Ansatz zur Beschreibung von Wahrscheinlichkeit und Ausmaß der Farbkernbildung bei Buche (*Fagus sylvatica* L.). Forstwissenschaftliches Centralblatt 120 (1-6), S. 154–172.
- Knorz M.; Schmidt M.; Torno S.; van de Kuilen J. W. (2013): Structural bonding of ash (*Fraxinus excelsior* L.) – resistance to delamination and performance in shearing tests. European Journal of Wood and Wood Products 72, S. 297-302.
- Koch, G. (2002): Biologische und chemische Untersuchungen über Inhaltsstoffe im Holzgewebe von Buche (*Fagus sylvatica* L.) und Kirschbaum (*Prunus serotina* Borkh.) und deren Bedeutung für Holzverfärbungen. Forschungsbericht. Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Holzwirtschaft, 216. Hamburg.

- Koch, G.; Bauch, J.; Puls, J.; Welling, J. (2002): Ursachen und wirtschaftliche Bedeutung der Holzverfärbung. *AFZ-Der Wald* (6), S. 315–318.
- Koch, G.; Florian L. C.; Holzkämper H.; Schmidt, U. (2003): Mikroskopische und spektroskopische Untersuchungen der Verleimungsqualität PVAc-verklebter Furnierkanten. *Holz als Roh- und Werkstoff* 61 (2), S. 103–111.
- Koch, G.; Reinsch, S. (2010): Die pH-Werte neu eingeführter Handelshölzer. *Holz-Zentralblatt* (9), S. 229.
- Krempf, H.; Mark, E. (1962): Untersuchungen über den Kern der Rotbuche. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung* 73, S. 186–191.
- Kučera, L. (1975): Die dreidimensionale Strukturanalyse des Holzes. *Holz als Roh- und Werkstoff* 33 (7), S. 276–282.
- Kučera, L. (1991): Die Buche und ihr Holz, eine Einführung in die Problematik. *Schweizerische Zeitschrift für das Forstwesen* 142, S. 363–373.
- Lopez-Suevos, F.; Richter, K. (2008): Influence of hydroxymethylated resorcinol primer on bond durability of Eucalyptus globulus glulams. *Proceedings. Final conference in COST E34 Bonding of timber. Sopron, Hungary, May 6-7.*
- Mack, H. (2006): Holzsortierung/Trends, Markt, Klebstoffe. Tagungsband. *Wiener Leimholz Symposium. Wien, Österreich, März 23-24.*
- Mahler, G.; Höwecke, B. (1991): Verkernungserscheinungen bei der Buche in Baden-Württemberg, in Abhängigkeit von Alter, Standort und Durchmesser. *Schweizerische Zeitschrift für das Forstwesen* 142 (5), S. 375–390.
- Marra, A. A. (1992): *Technology of wood bonding. Principles in practice.* New York: Van Nostrand Reinhold.
- Mehring, H. (1989): *Eigenschaften des Holzes von Kiefern (Pinus sylvestris L.) und Buchen (Fagus sylvatica L.) aus Waldschadensgebieten.* Dissertation. Universität Hamburg, Fachbereich Biologie.
- Mezger, T. (2010): *Das Rheologie Handbuch. Für Anwender von Rotations- und Oszillations-Rheometern.* 3. Aufl. Hannover: Vincentz Network, Farbe und Lack Edition.
- Molnár, S.; Németh, R.; Fehér, S. (2001): Technical and technological properties of hungarian beech wood consider the read heart. *Wood research - DREVÁRSKY VÝSKUM* 46, S. 21–30.
- Narayanamurti, D. (1957): Die Bedeutung der Holzextraktstoffe. *Holz als Roh- und Werkstoff* 15 (9), S. 370–380.
- Narayanamurti, D.; Gupta, R.C; Verma, G.M (1962): Influence of extractives on setting of adhesives. *Holzforschung und Holzverwertung* 14, S. 85–88.
- Nestic, R.; Milner, H. R. (1991): Shrinkage incuded stresses in adhesives joints of glued laminated timber. *Journal Institute Wood Science* 12 (4), S. 225–231.
- Niemz, P.; Jakob, M.; Hurst, A. (2005): Vergleichende Untersuchungen zu verschiedenen Möglichkeiten der Vergütung von Holz gegenüber holzerstörenden Pilzen. Teil 2: Diffusionswiderstand, Wasseraufnahme und Verhalten bei Freibewitterung. *Schweizerische Zeitschrift für das Forstwesen* 156 (6), S. 188–194.
- Noack, D.; Frühwald, A. (1976): Die Alterungsbeständigkeit von Holzverleimungen am Beispiel von Resorcin-Formaldehydharz-Verleimungen im Bootsbau. *Holz als Roh- und Werkstoff* 34 (3), S. 83–86.

- Northcott, P. L.; Kreibich, R. E.; Currier, R. A (1968): First replications comparing bond-degrade-accelerating systems. *Forest Products Journal* 18 (5), S. 58–66.
- Ohnesorge, D.; Henning, M.; Becker, G. (2009a): Bedeutung von Laubholz bei der Brettschichtholzerstellung *Holztechnologie*. *Holztechnologie* 50 (6), S. 47–49.
- Ohnesorge, D.; Richter, K.; Becker, G.; Aicher, S. (2009b): Adhesion behaviour of glued laminated timber from European beech. *Proceedings. Final conference in COST E34 Bonding of timber*. Sopron, Hungary, May 6-7.
- Ohnesorge, D.; Richter, K.; Becker, G. (2010): Influence of wood properties and bonding parameters on bond durability of European Beech (*Fagus sylvatica* L.) glulams. *Annals of Forest Science* 67 (6), S. 601.
- Packmann, D. F. (1960): The acidity of wood. *Holzforschung* 14 (6), S. 178–183.
- Pedieu, R.; Riedl, B.; Pichette, A. (2008): Measurement of wood and bark particles acidity and their impact on the curing of urea formaldehyde resin during the hot pressing of mixed panels. *Holz als Roh- und Werkstoff* 66 (2), S. 113–118.
- Perkitny, T.; Kingston, R. S. T. (1972): Review on the Sufficiency of Research on the Swelling Pressure of Wood. *Wood Science and Technology* 6, S. 215-229.
- Pillar, W. O (1966): Determining curing properties of an adhesive in contact with wood. *Forest Products Journal* 16 (6), S. 29–37.
- Pitzner-Scheffer, B. (1999): Delaminierung von Leimfugen in Brettschichtholz. Diplomarbeit. Universität Hamburg, Fachbereich Biologie am Ordinariat für Holztechnologie. Hamburg.
- Pizzi, A.; Lavischi, P.; Misani, C.; Triboulot, P. (2003): The compatibility of structural adhesives with wood. *Holz als Roh- und Werkstoff* 61, S. 288–290.
- Pizzi, A.; Mittal, K. L (2003): *Handbook of Adhesive Technology, Revised and Expanded*. 2. Aufl. Hoboken: Taylor and Francis.
- Plath, E. (1953): Studien über Phenolharzleime. Erste Mitteilung: Hitze und Säurehärtung. *Holz als Roh- und Werkstoff* 10 (11), S. 392–400.
- Poblete, H.; Roffael, E. (1985): Über chemische Veränderungen in Holzspänen bei der Herstellung von Phenolformaldehydharzgebundenen Spanplatten. *Adhäsion* 29 (3), S. 21–28.
- Pöhler, E.; Klinger, R.; Künniger, T. (2004): Rotkerniges Buchenholz - Vorkommen, Eigenschaften und Verwendungsmöglichkeiten. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Abteilung Holz. Dübendorf.
- Popper R. (1974): Die Einflüsse der Holzextraktstoffe auf das technologische Verhalten von Holz, insbesondere in Bezug auf die Verleimung. *SAH Bulletin*.
- Properzi, M.; Pizzi, A.; Uzielli, L. (2003): Comparative wet wood glueing performance of different types of Glulam wood adhesives. *Holz als Roh- und Werkstoff* 61 (1), S. 77–78.
- Racz, H.; Schulz, H.; Knigge, W. (1961): Untersuchung über das Auftreten des Buchenrotkerns. *Der Forst- und Holzwirt* 16 (19), S. 413–417.
- Radović, B.; Goth, H. (1994): Einkomponenten-Polyurethan-Klebstoffe für die Herstellung von tragenden Holzbauteilen. *Bauen mit Holz* (1), S. 22–33.
- Radović, B. (2005): Verklebung von Laubholz im konstruktiven Holzbau. Tagungsband. Holz-Innovativ, Symposium mit Fachausstellung. Rosenheim, Deutschland, April 6-7.

- Raknes, E. (1997): Durability of structural wood adhesives after 30 years ageing. *Holz als Roh- und Werkstoff* 55 (2-4), S. 83–90.
- River, B. H.; Vick, C.B.; Gillespie, R. H. (1991): Wood as an adherend. Treatise on adhesion and adhesives. Hg. v. J.D Minford. New York. Online verfügbar unter www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf1991/river91a.pdf, zuletzt geprüft am 25.10.2013.
- Roffael, E.; Rauch, W. (1974): Extraktstoffe in Eiche und ihr Einfluss auf die Verleimbarkeit mit alkalischen Phenol-Formaldehydharzen 32 (5), S. 182–187.
- Roffael, E. (1987): Veränderung von pH-Wert, Pufferkapazität und Gehalt an flüchtigen Säuren in waldfrischen Holzspänen durch Lufttrocknung. *Holz als Roh- und Werkstoff* 45 (11).
- Roffael, E.; Dix, B.; Bär, G.; Bayer, R. (1994): Über die Eignung von thermo-mechanischem und chemo-thermo-mechanischem Holzstoff (TMP und CTMP) aus Buchen- und Kiefernholz für die Herstellung von mitteldichten Faserplatten (MDF). *Holz als Roh- und Werkstoff* 52 (4), S. 239–246.
- Rowell, R. (1984): The chemistry of solid wood: based on a short course and symposium sponsored by the Division of Cellulose, Paper, and Textile Chemistry at the 185th meeting of the American Chemical Society, Seattle, Washington, March 20 - 25, 1983. American Chemical Society; Short course; Symposium; Meeting of the American Chemical Society. Washington, DC: American Chemical Society, Advances in chemistry series, 207.
- Sachsse, H. (1991): Kerntypen der Buche. *Forstarchiv* 62, S. 238–242.
- Sandermann, W.; Gerhardt, U.; Weißmann, G. (1970): Untersuchungen über flüchtige organische Säuren in einigen Holzarten. *Holz als Roh- und Werkstoff* 28 (2), S. 59–67.
- Sandermann, W.; Lüthgens, M. (1953): Untersuchungen über Verfärbungen von Hölzern. *Holz als Roh- und Werkstoff* 11 (11), S. 435–440.
- Sandermann, W.; Rothkamm, M. (1959): Über die Bestimmung der pH-Werte von Handelshölzern und deren Bedeutung für die Praxis. *Holz als Roh- und Werkstoff* 17 (11), S. 433–440.
- Scheikl, M. (1994): Elektrometrische Messung des Oberflächen-pH-Wertes von Holzarten. *Holzforschung und Holzverwertung* 46 (6), S. 105–106.
- Schmidt, M. (2008): Verklebung hochfester Laubhölzer für tragende Holzbauteile. Tagungsband. Doktorandenkolloquium Holzbau Forschung+Praxis. Stuttgart, Deutschland, März 5-6.
- Schmidt, M.; Glos, P.; Wegener, G. (2010a): Verklebung von Buchenholz für tragende Holzbauteile. *European Journal of Wood and Wood Products* 68 (1), S. 43–57.
- Schmidt, M.; Knorz, M.; Wilmes, B. (2010b): A novel method for monitoring real-time curing behaviour. *Wood Science and Technology* 44 (3), S. 407–420.
- Schmidt, M.; Knorz, M. (2010): Gluing of European beech (*Fagus sylvatica* L.) and Douglas fir (*Pseudotsuga Menziesii* Mirb.) for load bearing timber structures. Proceedings. 11th World Conference on Timber Engineering, Volume 1. Trentino, Italy, June 20-24.
- Schmidt, M.; Thönnißen, A.; Knorz, M.; Windeisen, E.; Wegener, G. (2012): Relevant wood characteristics for gluing beech and ash with regard to discoloration. *European Journal of Wood and Wood Products* 70 (1-3), S. 319–325.

- Schmidt, O.; Mehringer, H. (1989): Bakterien im Stammholz von Buchen aus Waldschadensgebieten und ihre Bedeutung für Holzverfärbung. *Holz als Roh- und Werkstoff* 47 (7), S. 285–290.
- Schneider, T.; Schäfer, M.; Hüster, H. G.; Roffael, E. (2000): Spanplatten aus rotkernigem Buchenholz. *Holz-Zentralblatt* 43, S. 530–531.
- Seeling, U. (1992): Abnorme Kernbildung bei Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) und ihr Einfluß auf holzbiologische und holztechnologische Kenngrößen. Dissertation. Forschungszentrum Waldökosysteme; Universität Göttingen. Göttingen ,A, 77.
- Sellers, T.; McSween, J.R.; Nearn, W.T. (1988): Gluing of Eastern Hardwoods: A Review. United States Department of Agriculture, Forest Service. New Orleans, Louisiana.
- Sernek, M.; Resnik, J.; Kamke, F. A. (1999): Penetration of liquid urea-formaldehyde adhesive into beech wood. *Wood and Fiber Science* 31 (1), S. 41–48.
- Slay, J. R.; Short, P.H.; Wright, D. C. (1980): Catalytic effects of extractives from pressure-refined fiber on gel time of urea-formaldehyde resin. *Forest Products Journal* 30 (3), S. 22–23.
- Sonderegger W.; Häring D.; Joščák M.; Krackler V.; Niemz, P. (2012): Untersuchungen zur Wasseraufnahme von Vollholz und Holzwerkstoffen. *Bauphysik* 34 (3), S. 101–106.
- Stamm, A. J. (1961): Three methods for determining the pH of wood and paper. *Forest Products Journal* 11, S. 310–312.
- Steiger, R.; Gehri, E.; Richter, K. (2010): Quality control of glulam: shear testing of bondlines. *European Journal of Wood and Wood Products* 68 (3), S. 243–256.
- Subramanian, R. V.; Somasekharan, K. N.; Johns, W. E. (1983): Acidity of wood. *Holzforschung* 37 (3), S. 117–120.
- Troughton, G. E. (1969): Accelerated aging of glue-wood bonds. *Wood Science* 1 (3), S. 172–176.
- Truax, T. R.; Selbo, M. L. (1948): Results of accelerated tests and long-term exposures on glue joints in laminated beams. *Transaction of the American Society of Mechanical Engineers*(70), S. 393–400.
- Vick, C. B.; Okkonen, E. A. (1997): Structurally durable epoxy bonds to aircraft woods. *Forest Products Journal* 47 (3), S. 71–77.
- Vick, C. B.; Okkonen, E. A. (1998): Strength and durability of one-part polyurethane adhesive bonds to wood. *Forest Products Journal* 48 (11), S. 71–76.
- Vick, C. B.; Richter, K.; River, B. H.; Fried, A. R. (1995): Hydroxymethylated resorcinol coupling agent for enhanced durability of bisphenol-A epoxy bonds to Sitka spruce. *Wood and Fiber Science* 27 (1), S. 2–12.
- Walter, M.; Kučera, L. (1991): Vorkommen und Bedeutung verschiedener Kernformen bei der Buche (*Fagus sylvatica* L.). *Schweizerische Zeitschrift für das Forstwesen* 142 (5), S. 391–406.
- Walther, T. (2002): Verleimung von Buchenholz unter verschiedenen Bedingungen. Diplomarbeit. Fachhochschule Eberswalde, Fachbereich Holztechnik.
- Windeisen, E.; Lesnino, G.; Schumacher, P. (2002): Investigation of the correlation between extractives content and natural durability in 20 cultivated larch trees. *Holz als Roh- und Werkstoff* 60 (5), S. 373–374.

Witt, M. (2004): Novel plate rheometer configuration allows monitoring real-time wood adhesive curing behavior. *Journal of Adhesion Science and Technology* 18 (8), S. 893–904.

Xing, C.; Zhang, S. Y.; Deng, J. (2004): Effect of wood acidity and catalyst on UF resin gel time. *Holzforschung* 58 (4), S. 408–412.

Zeppenfeld, G.; Grunwald, D. (2005): *Klebstoffe in der Holz- und Möbelindustrie. Leinfelden-Echterdingen: DRW-Verl. Weinbrenner.*

Zycha, H. (1948): Über die Kernbildung und verwandte Vorgänge im Holz der Rotbuche. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 67 (2), S. 80–109.

Zycha, H. (1953): Der rote Kern der Buche. *Holz-Zentralblatt* (79), S. 973–974.

Normen

ASTM D-2559 (2004): Standard Specification for Adhesives for Structural Laminated Wood Products for Use Under Exterior (Wet Use) Exposure Conditions. ASTM International. West Conshohocken.

DIN EN 923 (2005): *Klebstoffe — Benennungen und Definitionen.* Deutsches Institut für Normung e.V.. Berlin.

DIN EN 15148 (2002): *Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen.* Deutsches Institut für Normung e.V.. Berlin.

EN 301 (2006): *Adhesives, phenolic and aminoplastic, for load-bearing timber structures – Classification and performance requirements.* Comité Européen de Normalisation CEN. Brüssel.

EN 302-2 (2004): *Adhesives for load-bearing timber structures - Test methods – Part 2: Determination of resistance to delamination.* Comité Européen de Normalisation CEN. Brüssel.

EN 386 (2001): *Glued laminated timber - Performance requirements and minimum production requirements.* Comité Européen de Normalisation CEN. Brüssel.

EN 391 (2001): *Glued laminated timber - Delamination test of glue lines.* Comité Européen de Normalisation CEN. Brüssel.

EN 392 (1995): *Glued laminated timber – Shear test of glue lines.* Comité Européen de Normalisation CEN. Brüssel.

Kurzfassung

Die Verklebung von Buchenholz (*Fagus sylvatica* L.) für tragende Holzbauteile setzt voraus, dass sich dauerhafte Klebeverbindungen zwischen den Lamellen herstellen lassen. Es zeigte sich, dass dies mit MUF-Klebstoffen nur möglich ist, wenn bestimmte geschlossene Wartezeiten eingehalten werden. Um beurteilen zu können, inwieweit das Verfestigen des Klebstoffes durch Holzeigenschaften beeinflusst wird, wurden diese für farb- und unverkernte Buche bestimmt. Darüber hinaus wurde eine neue Methode entwickelt, die es erlaubt, das Verfestigen des Klebstoffes in Echtzeit zu beobachten.

Gluing of European beech (*Fagus sylvatica* L.) for load-bearing timber structures requires durable bonding of the lamellae. When certain closed assembly times are met, MUF adhesives are approved. To assess the influence of wood properties on the curing of adhesives, relevant parameters were determined for beech with and without coloured heartwood. Furthermore, a new method for monitoring real-time curing behaviour of adhesives between wood adherends was developed.

Appendix

Teilarbeit I

Schmidt, M.; Glos, P.; Wegener, G. (2010a): Verklebung von Buchenholz für tragende Holzbauteile. *European Journal of Wood and Wood Products* 68 (1), S. 43–57.

Dieser Artikel wurde eigenständig durch den Erstautor konzipiert und verfasst, sämtliche Untersuchungen wurden vollständig von ihm selbst durchgeführt. Der Beitrag der Co-Autoren umfasst die Betreuung der Arbeit sowie Vorschläge zur inhaltlichen und sprachlichen Verbesserung einer frühen Manuskriptversion.

Teilarbeit II

Schmidt, M.; Thönnißen, A.; Knorz, M.; Windeisen, E.; Wegener, G. (2012): Relevant wood characteristics for gluing beech and ash with regard to discoloration. *European Journal of Wood and Wood Products* 70 (1-3), S. 319–325.

Basierend auf den Ergebnissen der Teilarbeit I wurde diese Veröffentlichung vollständig vom Erstautor konzipiert und verfasst. Sämtliche Versuche wurden von Frau A. Thönnißen in den Laboreinrichtungen der Holzforschung München durchgeführt. Die Auswertung der Daten oblag vollständig dem Erstautor. Frau Dr. E. Windeisen half bei der Festlegung des Versuchsumfangs, der verwendeten Methoden sowie organisatorischen Fragen im Rahmen der Versuchsdurchführung. Die Co-Autoren halfen zudem bei der inhaltlichen und sprachlichen Überarbeitung einer frühen Manuskriptversion.

Teilarbeit III

Schmidt, M.; Knorz, M.; Wilmes, B. (2010b): A novel method for monitoring real-time curing behaviour. *Wood Science and Technology* 44 (3), S. 407–420.

Die Idee zur Entwicklung einer neuen Methode wurde vom Erstautor aufgeworfen und in Zusammenarbeit mit Herrn M. Knorz weiterentwickelt. Die Messungen wurden unter Anleitung des Erstautors von Frau B. Wilmes durchgeführt. Die Datenaufbereitung, deren Analyse sowie die inhaltliche Ausgestaltung der Veröffentlichung wurden vom Erstautor vorgenommen.

Lebenslauf

Michael K. Schmidt

geboren am 08. Mai 1977 in Bayreuth

Berufliche Erfahrung

- seit 2011 **Stellvertretender Referatsleiter im Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten; Referat Nachwachsende Rohstoffe**
- 2010 -2011 **Abteilungsleiter Forst am Amt für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten in Krumbach (Schwaben)**
- 2005-2010 **Technische Universität München; Lehrstuhl für Holzkunde und Holztechnik**
- 2003 - 2005 **Referendariat bei der Bayerischen Staatsforstverwaltung und Große Forstliche Staatsprüfung**

Wissenschaftliche Auszeichnungen

- 2011 **Wissenschaftspreis Weihenstephan der Stadt Freising**
- 2010 **Hanskarl-Goettling Preis**

Studium und Ausbildung

- 1997 - 2003 **Ludwig-Maximilians-Universität München,
Technische Universität München**
- Diplomstudiengang Forstwissenschaft**
- 1988 - 1996 **Markgraf-Georg-Friedrich-Gymnasium, Kulmbach**